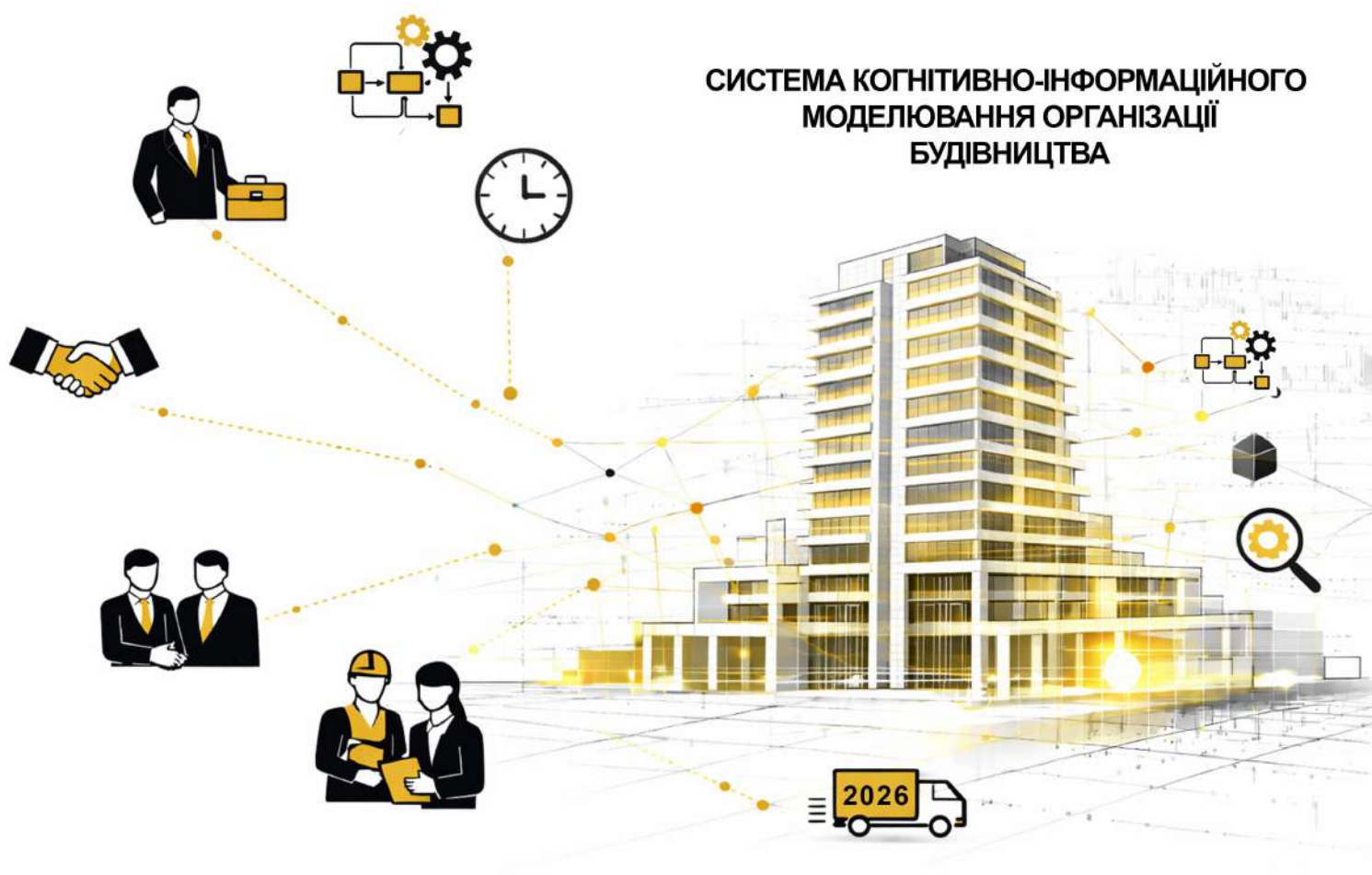


ЧУПРИНА Ю.А.

СИСТЕМА КОГНІТИВНО-ІНФОРМАЦІЙНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ
БУДІВНИЦТВА



**Київський національний університет будівництва і
архітектури**

Чуприна Ю.А.

**Система когнітивно-інтеграційного моделювання організації
будівництва**

Київ-2026

Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету
будівництва і архітектури (протокол № 40 від 26.02.2026 року)

Рецензенти:

д.т.н., професор **Антипенко Є.Ю.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

д.т.н., професор **Сердюк В.Р.**

Вінницький національний технічний університет (ВНТУ)

д.т.н., професор **Тугай О.А.**

Київський національний університет будівництва і архітектури (КНУБА)

**Чуприна Ю.А. Система когнітивно-інтеграційного моделювання організації
будівництва:** монографія. К.:ПП «Сердюк В.Л.», 2026. - 366 с.

У монографії досліджено теоретичні, методологічні та прикладні аспекти формування когнітивно-інтеграційної парадигми управління будівельними проєктами в умовах сучасного девелопменту. Розглянуто еволюцію управлінських підходів у проєктному менеджменті, трансформацію ролі знань у процесах прийняття управлінських рішень, а також особливості формування когнітивного простору будівельного проєкту в цифровому середовищі. Проаналізовано місце та функції BIM-технологій як інформаційної основи інтеграції проєктних даних, організаційних структур і знансєвих процесів, а також виявлено обмеження їх фрагментарного застосування у практиці управління.

У роботі наведено методологічні підходи до ідентифікації, формалізації та аналізу знань у BIM-середовищі, запропоновано моделі дослідження мережєвих структур і потоків знань у системах управління будівельними проєктами. Детально розглянуто механізми формування синергетичних ефектів у результаті інтеграції BIM-технологій, методів управління знаннями та організаційно-мережєвих форм взаємодії учасників проєкту. Окрему увагу приділено розробленню когнітивно-інтеграційної моделі управління будівельними проєктами, що поєднує інструменти BIM, IPD, методи мережєвого аналізу, кластеризації та алгоритмічної оптимізації. Представлено математичні та аналітичні моделі оцінки синергетичного ефекту впровадження інтегрованих BIM-систем, а також алгоритмічні підходи до оптимізації управлінських процесів на основі когнітивного аналізу. Розглянуто практичні аспекти інтеграції BIM і Big Data, адаптації когнітивних систем управління до умов публічних будівельних замовлень та емпіричної верифікації запропонованих моделей.

Запропонований когнітивно-інтеграційний інструментарій може бути використаний у діяльності девелоперських, проєктних і будівельних організацій, а також у наукових дослідженнях і освітніх програмах, спрямованих на інтелектуалізацію управління будівельними проєктами.

ISBN: 978-617-7047-59-8

© А. А. Чуприна, 2026

ВСТУП

Сучасний етап розвитку будівельної галузі характеризується істотним ускладненням проєктної діяльності, зростанням масштабів і вартості об'єктів будівництва, а також підвищенням вимог до керованості, узгодженості та результативності управлінських рішень. Будівельний проєкт у середовищі сучасного девелопменту дедалі частіше постає як складна відкрита система, у межах якої взаємодіють технічні, організаційні, економічні та інформаційно-знаннєві компоненти. За таких умов ключовим чинником ефективності управління стає не лише точність технічних розрахунків чи дотримання регламентів, а здатність системи управління забезпечувати цілісне осмислення проєктної ситуації та узгодження рішень між численними учасниками.

Класичні підходи до управління будівельними проєктами, сформовані в межах традиційної парадигми проєктного менеджменту, ґрунтувалися на принципах ієрархічності, лінійності процесів і переважанні формалізованих процедур контролю. Такі підходи демонстрували достатню ефективність у стабільних умовах із обмеженою кількістю змінних параметрів. Водночас у сучасних проєктах, для яких характерні багатоваріантність рішень, висока динаміка змін, інформаційна насиченість і складна мережа взаємозв'язків між учасниками, їх пояснювальний і прогностичний потенціал виявляється обмеженим. Це зумовлює потребу у переосмисленні управлінських підходів та розширенні їх аналітичних і інтерпретаційних можливостей.

У сучасних умовах управління будівельним проєктом дедалі більше набуває рис інтелектуального процесу, у межах якого ключову роль відіграють операції аналізу, інтерпретації, узгодження та трансформації інформації у знання. Управлінські рішення формуються не лише на основі формалізованих даних, а як результат взаємодії професійного досвіду, контекстного розуміння та колективної когнітивної діяльності учасників проєкту. Саме ця діяльність визначає здатність системи управління адаптуватися до змін, знижувати рівень інформаційних дисонансів і забезпечувати стійкість проєктних рішень упродовж усього життєвого циклу об'єкта.

Важливим чинником трансформації управлінських процесів у будівництві є впровадження технологій інформаційного моделювання будівель (BIM), які формують єдине цифрове середовище проєкту та забезпечують інтеграцію геометричних, технічних, організаційних і економічних даних. BIM-технології істотно розширюють можливості координації рішень і контролю змін, однак їх вплив на ефективність управління значною мірою залежить від того, наскільки ці технології інтегровані в реальний управлінський контур. За відсутності відповідних механізмів інтерпретації та використання інформації BIM-модель залишається інструментом зберігання даних, не перетворюючись на джерело управлінських знань.

У практиці сучасного будівництва часто спостерігається розрив між інформаційною насиченістю BIM-середовищ і здатністю управлінських команд використовувати наявну інформацію для прийняття узгоджених рішень. Це проявляється у зростанні кількості переробок, дублюванні функцій, конфліктах між учасниками та зниженні загальної керованості проєкту. Причини таких явищ мають не лише технічний, а передусім організаційний і знаннєвий характер, що вимагає розроблення інструментарію, спрямованого на формування спільного когнітивного простору проєкту.

Управління знаннями в будівельних проєктах постає як один із ключових напрямів підвищення ефективності управління. Йдеться не лише про накопичення та збереження інформації, а про створення умов для її осмислення, інтерпретації та використання у процесі прийняття рішень. Особливу складність становить інтеграція неявних знань, що формуються внаслідок професійного досвіду учасників проєкту та не піддаються безпосередній формалізації. Відсутність механізмів їх урахування призводить до втрати управлінського потенціалу та зниження якості рішень.

Актуальність даної монографії зумовлена необхідністю формування цілісного науково обґрунтованого підходу до організації управління будівельними проєктами в умовах цифрової трансформації. Такий підхід має поєднувати можливості BIM-технологій, методи управління знаннями та механізми когнітивної взаємодії учасників проєкту в єдину інтегровану систему. Саме інтеграційний характер управління створює передумови для виникнення синергетичних ефектів, що проявляються у зниженні транзакційних витрат, підвищенні узгодженості рішень і стійкості проєктної динаміки.

Важливим аспектом сучасних будівельних проєктів є зростання ролі мережевих форм організації взаємодії між учасниками. Проєктна діяльність дедалі рідше реалізується в межах жорстко фіксованих ієрархічних структур і все частіше ґрунтується на тимчасових, гнучких конфігураціях взаємодії, у яких розподіл функцій, відповідальності та інформаційних потоків є динамічним. За таких умов ефективність управління визначається здатністю системи підтримувати узгодженість дій у середовищі множинних центрів прийняття рішень. Це потребує переходу від локальної оптимізації окремих підсистем до управління цілісною мережею знансєвих і комунікаційних зв'язків.

У мережевому середовищі будівельного проєкту інформація набуває цінності лише за умови її контекстуальної інтерпретації. Одна й та сама інформаційна модель може по-різному сприйматися різними учасниками залежно від їхніх професійних ролей, досвіду та управлінських пріоритетів. Відсутність механізмів узгодження таких інтерпретацій призводить до когнітивних розривів, які проявляються у суперечливих рішеннях, затримках погоджень та зростанні транзакційних витрат. У цьому сенсі проблема управління будівельними проєктами виходить за межі технічної координації та набуває виразного знансєвого й організаційного виміру. Особливого значення в цьому контексті набуває поняття когнітивної стабільності системи управління, під якою доцільно розуміти здатність управлінського контуру зберігати узгодженість рішень за умов змін проєктних параметрів, зовнішніх обмежень і внутрішніх конфліктів. Когнітивна нестабільність, навпаки, призводить до фрагментації управлінських дій, втрати довіри між учасниками та деградації колективного знансєвого простору. Саме тому дослідження механізмів формування та підтримки когнітивної стабільності є важливим науковим завданням у сфері організації будівництва.

Інтеграція BIM-технологій у процеси управління створює передумови для підвищення когнітивної узгодженості, однак водночас загострює проблему перевантаження інформацією. Надмірна деталізація моделей, відсутність пріоритетизації даних і розмежування рівнів відповідальності можуть ускладнювати процес прийняття рішень і знижувати оперативність управління. Це зумовлює необхідність розроблення моделей, у яких інформаційні потоки структуровано відповідно до управлінських функцій і когнітивних потреб учасників проєкту. У межах даного дослідження особлива увага

приділяється синергетичним ефектам, що виникають у результаті інтеграції цифрових технологій, організаційних структур і знанневих процесів. Синергія розглядається не як механічна сума окремих ефектів, а як результат узгодженої взаємодії елементів системи, що проявляється у підвищенні результативності управління, зниженні невизначеності та зростанні адаптивності проєкту. Аналіз таких ефектів потребує системного підходу, здатного враховувати як кількісні, так і якісні характеристики управлінських процесів.

Важливим напрямом дослідження є також оцінювання впливу організаційно-мережових структур на динаміку знанневих потоків у будівельних проєктах. Вибір конфігурації взаємодії між учасниками визначає швидкість поширення інформації, рівень її інтерпретаційної узгодженості та здатність системи до колективного навчання. У цьому зв'язку особливого значення набувають методи аналізу мереж, кластеризації та моделювання взаємодій, які дозволяють формалізувати складні знаннєві процеси та інтегрувати їх у контур управління.

Загалом, подальший розвиток будівельної галузі в умовах цифрової трансформації потребує переходу від інструментального використання окремих технологій до формування цілісних інтелектуальних систем управління. Такі системи мають поєднувати технічні, організаційні та знаннєві компоненти в єдиній логіці управлінського мислення. Саме на розв'язання цього наукового завдання спрямоване дане дослідження, яке розглядає когнітивно-інтеграційний підхід як основу підвищення ефективності організації будівництва в середовищі сучасного девелопменту.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-КОГНІТИВНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПАРАДИГМИ УПРАВЛІННЯ БУДІВЕЛЬНИМИ ПРОЄКТАМИ

1.1. Еволюція управлінських підходів у проєктному менеджменті: від класичних моделей до когнітивно-орієнтованих систем

Людська діяльність неможлива без знань, адже саме вони становлять основу будь-якої форми розвитку суспільства. Обсяги, форми та типи знань настільки ж різноманітні, як і сфери людської активності. Без постійного створення, накопичення, обміну та практичного застосування знань людська цивілізація не змогла б ні сформуватися, ні зберегти своє існування.

Перший докорінний перелом у способі життя людини відбувся приблизно десять тисяч років тому — у період переходу від мисливсько-збирального до землеробського укладу. Цей процес став можливим завдяки одомашненню тварин, що започаткувало аграрну революцію. Її основою було поєднання фізичної сили людини й тварин у сільському господарстві, транспорті та комунікаціях. Поступове вдосконалення методів виробництва харчів сприяло підвищенню продуктивності праці, зростанню чисельності населення й формуванню великих поселень. Це, у свою чергу, зумовило розвиток урбанізації та виникнення міст як осередків культури й економіки.

Наступним етапом стали промислові революції, що суттєво змінили технологічну та соціальну структуру людства. Перша промислова революція (1760–1840 рр.) започаткувала епоху механізації виробництва завдяки винаходу парового двигуна та розвитку залізничного транспорту. Друга промислова революція, яка розгорнулася наприкінці XIX — на початку XX століття, принесла масове виробництво, зумовлене впровадженням електроенергії та конвеєрних технологій. Третя промислова революція, що розпочалася у 1960-х роках, стала відома як комп'ютерна або цифрова. Її рушійною силою були досягнення в галузі електроніки, зокрема створення напівпровідників, поява великих ЕОМ у 1960-х, персональних комп'ютерів у 1970–1980-х та глобальної мережі Інтернет у 1990-х роках. Ці історичні трансформації демонструють, що саме знання — ключовий ресурс, який визначає темпи та напрями розвитку людства.

Людству знадобилося близько шести тисячоліть, щоб аграрна епоха поступилася місцем індустріальній, яка розпочалася приблизно у 1815 році. Проте вже до 1960 року, менш ніж за півтора століття, промислова ера завершилася, поступившись місцем добі послуг. У цей період основна частина населення почала працювати у сфері надання послуг, а не у виробництві матеріальних благ. Наприкінці 1980-х років відбулася чергова трансформація — людство вступило в інформаційну епоху, коли більшість економічно активних людей були залучені до створення, зберігання та обробки інформації. На початку XXI століття ця тенденція набула нового виміру — розпочалася ера комунікацій, у якій провідне місце займає обмін даними, ідеями, контентом, новинами та культурними продуктами.

Науково-дослідницька діяльність XXI століття істотно відрізняється від тієї, що була характерною для XIX і XX століть. Якщо у XIX столітті головна увага зосереджувалася на предметі виробництва, а у XX — на засобах виробництва, то сьогодні в центрі перебуває сам суб'єкт виробництва — людина зі своїми знаннями,

компетентностями та когнітивними можливостями. Саме людський інтелект, креативність і здатність до навчання стають головними факторами розвитку.

Сучасна наукова спільнота дедалі більше об'єднується навколо єдиної когнітивної парадигми, яка поєднує різні галузі знань — від психології та нейронауки до інформатики й філософії свідомості. Такий міждисциплінарний підхід дозволяє комплексно досліджувати процеси мислення, пізнання та створення знань.

Зростання інтересу до когнітивних досліджень зумовлене трансформацією сучасного суспільства, яке переходить від інформаційного до суспільства знань — нового етапу цивілізаційного розвитку, де ключову роль відіграють не лише дані, а й уміння осмислювати, інтерпретувати та ефективно застосовувати їх у практичній діяльності.

У 2002 році Національний науковий фонд США опублікував звіт під назвою «Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science» («Конвергентні технології для покращення людських можливостей: нанотехнології, біотехнології, інформаційні технології та когнітивні науки»), у якому було представлено прогноз розвитку науки на найближчі п'ятдесят років [222].

У цьому документі науковці окреслили нове бачення перспектив трансдисциплінарної інтеграції знань і технологій, що передбачає тісне поєднання різних галузей науки. Саме тоді було запроваджено поняття NBIC-конвергенції, де N означає нанотехнології, B — біотехнології, I — інформаційні технології, а C — когнітивні науки. Ця концепція відображає ідею синергії між ключовими напрямками науково-технологічного прогресу, спрямованими на підвищення інтелектуальних, фізичних і соціальних можливостей людини.

Когнітивні науки у цьому контексті виступають центральною ланкою інтеграційних процесів — це міждисциплінарна галузь, що об'єднує психологію, нейрофізіологію, лінгвістику, інформатику, філософію свідомості та інші напрями, пов'язані з вивченням пізнання. Термін «cognitio» у перекладі з латини означає «знання» або «пізнання», що точно передає сутність цієї науки [203].

Поняття «когнітивний» описує процеси пізнавальної діяльності людини з точки зору інформаційного обміну між людиною та її середовищем. Основними завданнями когнітивних систем є отримання нових знань, прийняття оптимальних рішень у складних ситуаціях і інтелектуальна обробка великих обсягів даних. Це відкриває перспективи для створення технологій нового покоління, здатних підсилювати інтелектуальні можливості людини та сприяти розвитку суспільства знань.

Когнітивні технології — це комплексна система знань, умінь, навичок, методів, засобів діяльності та алгоритмів досягнення поставлених цілей, що базується на розумінні процесів пізнання, навчання, комунікації та обробки інформації. Первинно когнітивні технології сформувалися в межах інформатики — як технології створення інтерфейсів взаємодії між людиною та комп'ютером. Першими прикладами їх практичного застосування стали графічні інтерфейси користувача, розроблені компаніями Apple і Microsoft, які суттєво змінили принципи взаємодії людини з обчислювальними системами.

У межах даного дослідження під когнітивними механізмами розуміють сучасні концепції інформаційного моделювання, інтегрованої реалізації проєктів і використання великих даних (Big Data), а також пов'язані з ними методи, інструменти та апаратно-програмні засоби. Інтегроване застосування таких механізмів забезпечує можливість

ефективного отримання, оброблення, збереження та використання знань, що генеруються в межах проєктної діяльності. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню результативності реалізації проєктів, досягненню запланованих цілей і зростанню ймовірності їх успішного завершення.

Таким чином, людство пройшло еволюційний шлях від сили м'язів до сили розуму. Якщо раніше головним об'єктом людської праці було виробництво й переміщення матеріальних речей, то сьогодні центр уваги змістився до генерування, опрацювання та поширення ідей і знань. У сучасному суспільстві саме інтелектуальний потенціал, здатність до креативного мислення та обміну знаннями визначають цінність людини й організації загалом.

Промислові революції стали ключовими етапами переходу від використання фізичної сили до механічної енергії, а нині — до пізнавальної діяльності людини як рушійної сили розвитку. Четверта промислова революція базується на цифрових технологіях, що поєднують апаратне та програмне забезпечення з розгалуженими мережевими структурами. Їхнє стрімке вдосконалення та інтеграція спричиняють глибоку трансформацію суспільства й світової економіки. Основним драйвером цієї революції є швидкий розвиток інформаційних технологій і всього спектра суміжних галузей, які формують нову еру взаємодії людини, знань і технологічних систем.

Хоча термін «управління знаннями» набув широкого поширення на Заході лише наприкінці XX століття, це не означає, що питання, пов'язані з управлінням організаційними знаннями, раніше не привертало уваги дослідників. Ще Френсіс Бекон наголошував: «Знання – сила» [211], а Альфред Маршалл у 1890 році писав: «Знання – наш найпотужніший двигун виробництва» [178]. Уже тоді було очевидно, що знання становлять основу розвитку цілих галузей, відіграють вирішальну роль у функціонуванні організацій і є ключовим джерелом інновацій та конкурентних переваг.

У сучасному динамічному середовищі володіння знаннями лише на індивідуальному рівні вже не є достатнім. Швидкий розвиток технологій і зростання конкуренції вимагають активного обміну знаннями та їх ефективного використання на рівні організацій. Hendricks і Vriens [144] зазначають, що активи підприємства створюють основу для стійкої конкурентної переваги. Тому компанія, яка системно управляє знаннями, має значно більше шансів на довгострокове успішне функціонування, ніж та, що не розвиває цей напрям діяльності.

У науковій літературі вже давно розмежовано поняття «дані», «інформація» та «знання». Як підкреслює вчений, немає сенсу вводити настільки складну концепцію, як знання, у сферу управлінської теорії та практики, якщо не враховувати ті особливі характеристики знання, які роблять його унікальним і принципово відмінним від інформації [361].

Згідно з Martensson [179], дані, інформація та знання утворюють ієрархічну структуру (рис. 1.1). На найнижчому рівні цієї ієрархії розташовані дані, тоді як знання займають найвищий рівень. Дані зазвичай визначаються як сукупність дискретних, об'єктивних фактів про події чи явища. Інформація, своєю чергою, являє собою набір даних, доповнених поясненнями, інтерпретаціями чи контекстом, що дозволяє пов'язати їх із певним об'єктом, процесом або ситуацією. Знання ж є складнішою категорією, оскільки вони передбачають осмислення, узагальнення та практичне застосування отриманої інформації.

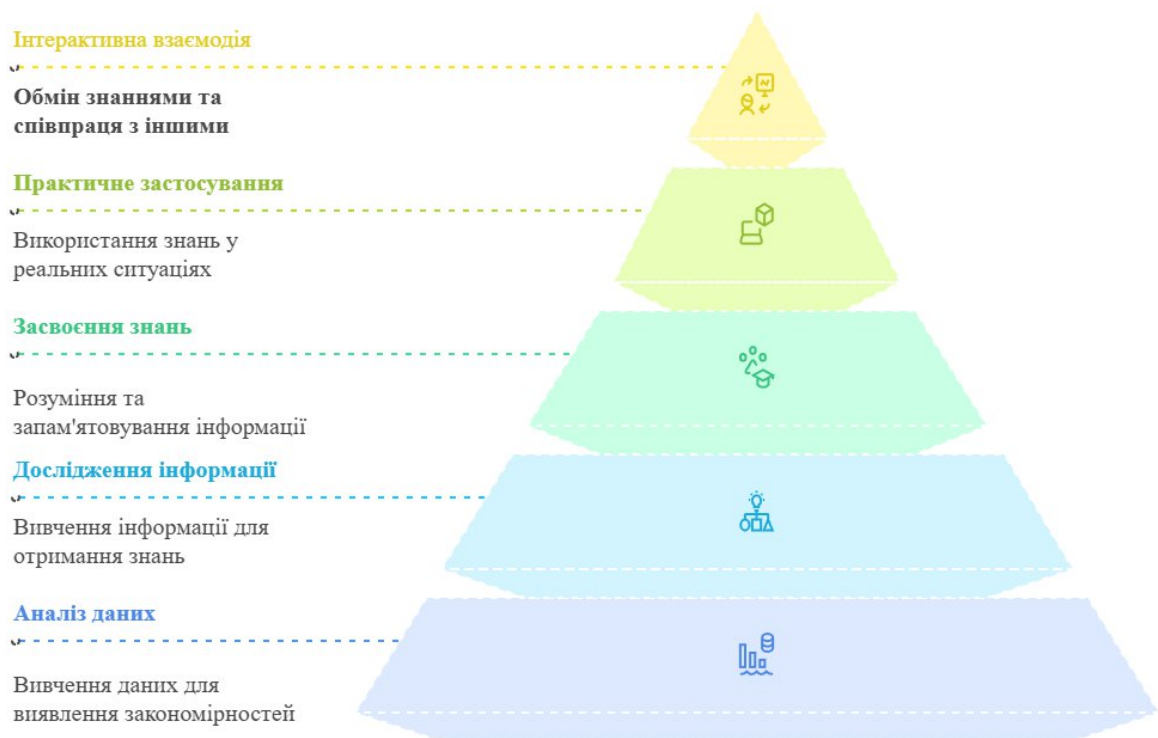


Рис. 1.1. Ієрархічна взаємозалежність між даними, інформацією та знаннями
(розроблено автором на основі [179])

Shannon і Weaver [119] запропонували абстрактне визначення інформації, засноване на концепції ентропії. Згідно з їх підходом, чим вищий рівень ентропії, тим більша невизначеність, адже знайомі ситуації генерують менше інформації, ніж нові або непередбачувані. Водночас лише досвідчена людина здатна розпізнати нове навіть у знайомих повідомленнях [238]. Це веде до так званого парадоксу експерта: чим більший досвід має людина, тим ефективніше вона знаходить потрібну інформацію, але тим менше нової цінності ця інформація для неї становить [233].

З глобальної точки зору, інформацію можна визначити як будь-які стимули, які людина сприймає або розпізнає у навколишньому середовищі, що передбачає виявлення закономірностей у матеріальних чи енергетичних потоках довкілля. Таким чином, інформацію доцільно розглядати як кількість і характер повідомлень, необхідних для подолання невизначеності. З цієї позиції інформація набуває цінності тоді, коли вона допомагає зменшити невизначеність і сприяє прийняттю більш обґрунтованих рішень.

На думку Wiig, головна відмінність між інформацією та знаннями полягає в їх природі та функціональності. Знання охоплюють не лише фактичний матеріал, а й уявлення, судження, концепції, методи, припущення, погляди й практичні навички, що формують здатність діяти свідомо та цілеспрямовано. Інформація, натомість, є системою фактів і даних, які набувають змісту лише тоді, коли інтерпретуються крізь призму наявних знань. Саме знання дозволяють людині осмислювати інформацію, робити висновки й приймати обґрунтовані рішення [68].

За підходом Drucker, знання — це не просто володіння інформацією, а здатність застосовувати її на практиці у певній сфері діяльності. Він підкреслює, що реальна конкурентна перевага організації ґрунтується на специфічних знаннях, якими володіють її

працівники, і саме вони визначають потенціал розвитку та стійкість бізнесу в умовах мінливого середовища.

У цьому ж контексті Karlsen і Gottschalk описують знання як поєднання інформації з особистим досвідом, контекстом, здатністю до інтерпретації, рефлексії, інтуїції та творчого осмислення. Такий підхід відображає динамічну природу знання як процесу, що формується у взаємодії мислення, сприйняття й практики [52].

Davenport і Prusak визначають знання як цілісну систему, у якій поєднуються досвід, цінності, контекстуальні відомості та експертне розуміння. Саме ця сукупність створює базу для засвоєння нового досвіду, оцінювання ситуацій і прийняття ефективних рішень, роблячи знання живою, змінною та еволюційною категорією [231].

Проблематика управління знаннями на рівні організації також привертала значну увагу дослідників. Екк визначає знання в контексті діяльності організації як її здатність розпізнавати явища, реагувати на зміни зовнішнього середовища, створювати ефективні засоби комунікації, формувати бачення майбутнього та розвивати необхідні компетенції [148]. Такий підхід підкреслює, що знання є не лише сукупністю інформації, а динамічним ресурсом, який забезпечує адаптивність, гнучкість і здатність до інновацій.

Dean і Kretschmer зазначають, що не всі ідеї можуть вважатися елементами інтелектуального капіталу — лише ті, що мають практичне застосування у виробничих чи управлінських процесах. Це твердження особливо важливе для організацій, адже воно демонструє, що знання мають цінність лише тоді, коли перетворюються на конкретні дії або результати. У такому випадку знання стають стратегічним активом, який дозволяє краще розуміти середовище, в якому функціонує організація, і створювати конкурентні переваги.

На рівні організації знання проходять кілька етапів життєвого циклу (рис. 1.2). Згідно з моделлю цей цикл складається з чотирьох основних фаз [150]:

1. Захоплення знань. Цей етап включає пошук і фіксацію знань як у внутрішньому, так і у зовнішньому середовищі. Йдеться про виявлення цінної інформації, досвіду та практик, які можуть бути використані в подальшій діяльності [377].
2. Організація знань. Зібрані дані та інформація мають бути впорядковані таким чином, щоб співробітники могли легко використовувати їх для створення нових знань. На цьому етапі застосовуються інструменти індексації, кластеризації, каталогізації та фільтрації, що забезпечують логічну структуру баз знань.
3. Фільтрація знань. Вона передбачає інтелектуальну обробку та систематизацію інформації з метою перетворення неявних знань у явні. Це дає змогу зробити знання зрозумілими, доступними й придатними для подальшого використання.
4. Передача знань. Завершальний етап полягає у поширенні знань у межах організації за допомогою спеціальних механізмів і технологічних засобів, що забезпечують ефективний обмін інформацією та накопичення спільного досвіду.

Таким чином, життєвий цикл знань охоплює не лише процес їх накопичення, а й трансформацію у стратегічний ресурс, що сприяє підвищенню ефективності управління, розвитку інновацій і забезпеченню конкурентоспроможності організації.

Проблема класифікації знань має особливе значення, адже різні типи знань по-різному впливають на процеси їх передачі, засвоєння та практичного використання. У науковій літературі існує багато підходів до поділу знань, кожен з яких відображає певний аспект цього складного феномену.

Перша – know-what (знати що) – охоплює фактичні відомості та опис подій, тобто знання, які можна ототожнити з інформацією. Друга – know-why (знати чому) – пов’язана з розумінням причинно-наслідкових зв’язків і принципів функціонування явищ у природі, суспільстві чи технічних системах. Третя – know-how (знати як) – стосується практичного досвіду, умінь і навичок, які дають змогу виконувати конкретні дії; саме цей тип знань найчастіше притаманний фахівцям і експертам, що здобули компетентність через практику. Четверта – know-who (знати хто) – відображає знання про людей, їхню компетентність, професійні зв’язки та мережі взаємодії, які сприяють ефективному обміну інформацією.

Інший підхід до класифікації запропонував Круг, який поділив знання на імпліцитні та експліцитні. Імпліцитне знання формується на основі особистого досвіду, спостережень і цінностей. Воно часто залишається неусвідомленим і складним для вербалізації або передачі іншим людям. Експліцитне знання, навпаки, є формалізованим і зазвичай зафіксованим у документах, інструкціях, моделях чи базах даних, що дозволяє легко поширювати його в організаційному середовищі.

Таким чином, різні підходи до класифікації дозволяють розглядати знання як багаторівневу систему, у якій поєднуються фактична інформація, практичні вміння та здатність розуміти взаємозв’язки між ними. Це створює основу для ефективного управління знаннями в умовах сучасної динамічної організаційної діяльності.



Рис. 1.2. Стадії розвитку та обігу знань у межах організації
(розроблено автором на основі [17])

Класичним і водночас одним із найпоширеніших підходів до класифікації знань вважається концепція, запропонована Polanyi, який поділив знання на явні та неявні. Цей

поділ став основою для формування інших дихотомій у сфері управління знаннями, таких як локальні й універсальні, кодифіковані й некодифіковані, канонічні й неканонічні, процедурні та декларативні знання [373].

Явне знання — це знання, яке може бути чітко сформульоване, задокументоване або передане у письмовій чи візуальній формі. Завдяки своїй структурованості воно легко поширюється між людьми всередині організації, а також може бути збережене в різних форматах — звітах, схемах, кресленнях, базах даних тощо. Явні знання підлягають кодифікації, тобто переведенню у формалізований вигляд із використанням прийнятої системи символів і понять, спільно зрозумілих усім учасникам процесу комунікації. Такий процес забезпечує швидке поширення інформації та підвищує якість управління знаннями. По суті, кодифікація дозволяє створити спільну мову для обміну знаннями, роблячи їх доступними для колективного використання.

Неявні знання, на відміну від явних, мають інтуїтивний і досвідний характер. Вони ґрунтуються на особистих переконаннях, практичному досвіді, внутрішніх моделях мислення й професійних навичках, що настільки глибоко інтегровані у свідомість людини, що стають частиною її поведінкових реакцій. Такі знання складно формалізувати, передати або зафіксувати у документальній формі. Управління неявними знаннями передбачає створення умов для їх обміну через безпосередню взаємодію між людьми — спільну діяльність, наставництво, командну роботу, професійні обговорення.

Основна мета управління неявними знаннями полягає у тому, щоб перетворити індивідуальний досвід окремих працівників у спільне надбання організації. Проте цей процес є надзвичайно складним, адже неявні знання унікальні, суб'єктивні й практично не піддаються кодифікації. Їхня цінність полягає саме в їх неповторності та неможливості повного копіювання, що робить їх важливим джерелом конкурентних переваг організації.

Скирме визначає управління знаннями як цілеспрямовану та системну діяльність, спрямовану на ідентифікацію, збирання, структурування, поширення, використання та вдосконалення знань, що мають стратегічне значення для організації. Головною метою такої діяльності є ефективне використання наявного інтелектуального потенціалу для досягнення організаційних цілей і забезпечення стійкої конкурентоспроможності.

Згідно з визначенням Xerox Corporation, управління знаннями — це процес формування продуктивного робочого та навчального середовища, яке сприяє безперервному створенню, накопиченню, узагальненню та застосуванню як колективних, так і індивідуальних знань для формування нових бізнес-цінностей. Цей підхід акцентує увагу не стільки на знаннях як ресурсі, скільки на динамічних процесах їх формування, розвитку та практичного використання. Таким чином, управління знаннями розглядається не як статичне збереження інформації, а як безперервний процес навчання, обміну досвідом і створення нових рішень, що забезпечують зростання ефективності діяльності організації.

Управління знаннями можна розглядати як стратегічний підхід до оптимізації бізнес-процесів, який передбачає виявлення, відбір, упорядкування, обробку та збереження інформації, що є важливою для діяльності компанії. Головна мета такої стратегії полягає у підвищенні продуктивності працівників, ефективності процесів і загальної конкурентоспроможності організації.

Система управління знаннями включає технології та методи, спрямовані на створення, розвиток і поширення знань у межах організації. Серед основних формалізованих методів цього процесу виділяють [71]:

- пошук і вилучення знань із різних джерел;
- структурування та систематизацію знань для забезпечення їх ефективного зберігання й швидкого доступу;
- аналіз знань з метою виявлення закономірностей, зв'язків і аналогій;
- оновлення та актуалізацію знань відповідно до змін у зовнішньому середовищі;
- поширення знань серед працівників організації;
- створення нових знань шляхом досліджень, навчання та інноваційної діяльності.

Розвиток управління знаннями зумовлений низкою чинників, які виступають його рушійними силами. До них належать:

- зростання ролі знань і нематеріальних активів як основи формування сучасного капіталу;
- усвідомлення, що люди є головним носієм і джерелом організаційних знань;
- прискорення темпів змін на ринках, підвищення конкуренції та динамічний розвиток технологій, які вимагають постійного навчання;
- визнання того, що інновації є ключовим чинником підвищення конкурентоспроможності й безпосередньо залежать від створення та застосування знань;
- зростання значення міжнародного обміну знаннями та міжкордонних транзакцій;
- постійне розширення технологічних можливостей, зокрема розвиток інформаційних технологій і засобів комунікації.

Для підвищення ефективності управління знаннями організаціям необхідно враховувати низку ключових процесів:

1. Оцінку нематеріальних активів і потенціалу знань, визначення їх впливу на діяльність компанії.
2. Ефективне управління персоналом і розвиток спільнот практиків, які забезпечують обмін знаннями.
3. Формування культури безперервного навчання та професійного розвитку.
4. Стимулювання створення нових знань і підтримку інноваційної діяльності.
5. Організацію управління транскордонними потоками знань і процесами їх інтеграції.
6. Активне використання інформаційних технологій для збереження, обробки та поширення знань.

Таким чином, управління знаннями виступає не лише технологічним або організаційним інструментом, а цілісною стратегією, що сприяє підвищенню інтелектуального потенціалу організації, створенню нових можливостей розвитку та зміцненню її позицій на ринку.

Реалізація проєктів у будівельній галузі, за визначенням Ochieng і Price, є складним, багатофакторним процесом, що відбувається в динамічному та нестабільному середовищі, де спостерігається непередбачуваність робочих схем, унікальність завдань і тимчасовість командних структур. Будівництво як галузь також характеризується обмеженістю доступних ресурсів, високим рівнем ризику та інтенсивною конкуренцією. Саме ці чинники визначають особливу актуальність управління знаннями, яке стає

ключовим інструментом підвищення ефективності, стійкості та інноваційності будівельних організацій.

Разом з тим, упровадження систем управління знаннями в будівництві супроводжується низкою проблем, які ускладнюють цей процес. До основних перешкод, що гальмують розвиток ефективного управління знаннями, належать [71]:

- обмежений час, який працівники можуть присвятити обміну знаннями;
- низький рівень організаційної культури, що перешкоджає відкритій взаємодії;
- відсутність уніфікованих стандартів і регламентів робочих процесів;
- нестача фінансових ресурсів для впровадження відповідних систем і технологій.

Ці проблеми є типовими не лише для будівельної сфери, але й для інших галузей промисловості, де управління знаннями розглядається як стратегічний ресурс. Особливо гострою проблемою є обмеження часу: компанії часто очікують, що працівники виконуватимуть завдання з управління знаннями паралельно зі своїми основними обов'язками, що призводить до перевантаження.

Дослідження численних авторів підтверджують, що саме організаційна культура є одним із головних бар'єрів для вільного обміну знаннями. Dainty наголошує, що основне завдання систем управління знаннями полягає у створенні таких умов, за яких працівники будуть зацікавлені добровільно ділитися своїми знаннями. Відсутність стандартних процедур і методологій, своєю чергою, ускладнює адаптацію нових технологій, знижуючи ефективність реалізації проєктів і перешкоджаючи поширенню найкращих практик у межах організації.

Для кращого розуміння специфіки впровадження управління знаннями в будівельній галузі доцільно узагальнити основні проблеми, з якими стикаються організації під час реалізації цього процесу. У таблиці 1.1 наведено ключові перешкоди, їх характеристику та можливі наслідки для ефективності управління знаннями.

Таблиця 1.1.

Основні проблеми впровадження управління знаннями в будівельній галузі
(розроблено автором на основі [13])

№	Проблема	Характеристика впливу	Потенційні наслідки
1	Недостатність часу	Працівники перевантажені операційною роботою і не мають змоги приділяти увагу обміну знаннями	Зниження ефективності накопичення та поширення знань
2	Низький рівень організаційної культури	Відсутність довіри, небажання ділитися досвідом	Формування інформаційних бар'єрів, втрата знань
3	Відсутність стандартних процесів	Нестача єдиних методологій і регламентів роботи	Дублювання зусиль, хаотичність у виконанні завдань
4	Недостатнє фінансування	Обмежені інвестиції в цифрові платформи та навчання персоналу	Низький рівень автоматизації управління знаннями, відставання у розвитку

Ефективне впровадження управління знаннями в будівництві потребує не лише технологічних рішень, а й стратегічних змін у культурі управління, стандартизації процесів та створення мотиваційних механізмів для підтримки активного обміну знаннями.

Опитування, проведене серед британських проєктних організацій, свідчить, що майже половина респондентів розглядає управління знаннями як інструмент, який стимулює впровадження новітніх технологій і процесів, здатних забезпечити суттєві переваги для розвитку компаній. Robinson та його колеги у своєму дослідженні, проведеному серед інженерних і будівельних підприємств Великої Британії, визначили основні рушійні сили, що мотивують впровадження управління знаннями. До них належать [159]:

- прагнення до постійного вдосконалення діяльності;
- обмін цінними неявними знаннями між працівниками;
- поширення найкращих практик;
- здатність швидко реагувати на запити клієнтів;
- зменшення кількості переробок і повторних дій;
- створення нових продуктів та послуг.

Переваги, що виникають у результаті запровадження систем управління знаннями, умовно поділяються на короткотермінові та довготермінові залежно від ступеня їх впливу на ефективність проєктної діяльності.

Короткотермінові переваги зазвичай проявляються у скороченні витрат на трудові, матеріальні й технічні ресурси, підвищенні продуктивності праці та ефективності використання даних. Це дозволяє швидше виконувати роботи, забезпечуючи вищу якість і раціональніше використання ресурсів.

До довготермінових переваг належать:

- підвищення рівня якості обслуговування клієнтів і швидкості реагування на їх потреби;
- зміцнення системи контролю та покращення керованості процесів;
- підвищення загальної якості послуг;
- прискорення обороту капіталу;
- оперативніше й обґрунтованіше прийняття управлінських рішень;
- розширення можливостей керівництва щодо контролю за виконанням завдань;
- покращення морально-психологічного клімату в колективі та зростання рівня задоволеності працівників.

Дослідження, проведені Windrum та den Hertog і Bilderbeek, показали, що проєктні, архітектурні та інші будівельні послуги належать до наукомістких секторів економіки. Особливістю таких галузей є специфіка їхнього «продукту» — він має переважно інтелектуальний характер і формується через застосування знань, досвіду та творчих рішень. Саме ця характеристика визначає ключову роль наукомістких сфер у розвитку регіональних і національних інноваційних систем [202].

Якщо у виробничих галузях більшість знань має кодифікований характер (тобто може бути зафіксована у формі інструкцій, технічних описів чи стандартів), то для наукомістких галузей, зокрема будівництва, характерна висока частка неявних знань. Такі знання зберігаються у свідомості людей і є результатом накопиченого досвіду, практики,

інтуїції та професійного спостереження. Вони можуть мати як технічний характер (ноу-хау спеціаліста), так і когнітивний — пов'язаний із цінностями, переконаннями, культурними особливостями або стилем мислення.

У будівельній сфері прикладами неявних знань є навички проведення оцінок і тендерів, глибоке розуміння технологічних процесів будівництва, уміння взаємодіяти з клієнтами, партнерами чи членами проєктної команди. Ці знання формуються поступово, на основі практичного досвіду, і мають індивідуальний характер, що робить їх складними для формалізації чи передачі іншим.

Натомість явні знання мають формалізований вигляд і можуть бути збережені у вигляді документів, інструкцій, креслень або технічних характеристик. Їх головна перевага полягає у можливості стандартизації, повторного використання та легкого поширення між фахівцями. До прикладів явних знань у будівництві належать правила проєктування, технічні норми, креслення в паперовому чи електронному форматі, а також регламентовані методи виконання робіт.

Будівельні послуги належать до категорії наукомістких, оскільки їх основою є спеціалізовані експертні знання, досвід і ноу-хау, що формують головну цінність кінцевого продукту. Так само, як приблизно 70% собівартості нового автомобіля пов'язано з інтелектуальними складовими — проєктуванням, розробленням програмного забезпечення та інженерними рішеннями, аналогічна ситуація спостерігається і у сфері будівництва сучасних об'єктів. Значна частина витрат у таких проєктах припадає на знаннево-орієнтовані елементи: архітектурне та інженерне проєктування, аналіз і оцінку альтернативних варіантів вартості, консультації з договірних питань, управління ризиками, контроль якості та забезпечення безпеки під час реалізації проєкту.

Результати досліджень компаній, що займаються проєктуванням, свідчать, що на етапі концептуального проєктування приблизно 80% усіх знань є неявними, тоді як частка явних знань становить близько 20%. На етапі детального проєктування співвідношення змінюється у зворотному напрямку — 80% становлять явні знання, а неявні лише 20%. Такий перехід свідчить про поступову формалізацію накопиченого досвіду та його перетворення на структуровані знання, що можуть бути використані для стандартизації процесів і підвищення ефективності управління проєктом.

Ключовим чинником успішного управління знаннями у будівництві є саме динамічна взаємодія між неявними та явними знаннями. Цей процес забезпечує обмін досвідом, сприяє узгодженню рішень між фахівцями різних рівнів і полегшує прийняття стратегічно важливих рішень під час реалізації проєктів.

Відповідно до теорії створення знань Nonaka і Takeuchi [228], цей процес може відбуватися через чотири взаємопов'язані способи взаємодії, які формують основу механізму перетворення знань (рис. 1.3).

Знання у сфері будівництва формуються завдяки спільній діяльності окремих фахівців, проєктних груп і будівельних організацій. Вони виникають у результаті взаємодії різних типів знань — явних і неявних — на всіх етапах реалізації проєкту: від початкового концептуального проєктування до введення об'єкта в експлуатацію. Цей процес відбувається динамічно, забезпечуючи безперервне накопичення та трансформацію досвіду.



Рис. 1.3. Концептуальна модель генерування та обміну знаннями SECI
(розроблено автором на основі [22])

1. Соціалізація — це процес передачі неявних знань через безпосередню взаємодію між людьми. Прикладом може слугувати ситуація, коли архітектор пояснює клієнтові концепцію дизайну під час зустрічі або коли учні-теслі, муляри чи монтажники навчаються у досвідчених майстрів, спостерігаючи за їхньою роботою, наслідуючи дії та практикуючись. Такий спосіб навчання ґрунтується не на теоретичних знаннях, а на спільному досвіді та наставництві. У будівельній галузі ця традиція має глибокі історичні корені, адже саме через соціалізацію передаються навички, інтуїтивне розуміння процесів і майстерність. Молоді інженери, архітектори чи проєктанти часто поєднують академічну освіту з практичним навчанням під керівництвом наставників, які допомагають їм розвивати професійні компетентності та адаптуватися до реальних умов проєктної роботи.

2. Інтерналізація — це процес, у якому явні знання перетворюються на неявні. Наприклад, архітектор, вивчаючи підручники з теорії архітектури або керівництва зі стандартів дизайну, трансформує письмову інформацію у власне розуміння, формуючи внутрішні ментальні моделі, що допомагають створювати нові дизайнерські рішення відповідно до вимог замовника. Таким чином, знання, зафіксовані у документах, стають частиною професійного досвіду спеціаліста.

3. Екстерналізація — це процес зворотний до інтерналізації, коли неявні знання набувають явної форми, що дозволяє передавати їх іншим. Прикладом є ситуація, коли архітектор формулює свої ідеї у вигляді креслень або письмових інструкцій для підрядників, інженерів і проєктантів. Аналогічно, обговорення між архітектором і підрядником, під час якого відбувається уточнення деталей проєкту, а потім створюється документація, є прикладом екстерналізації — перетворення досвіду та інтуїції у конкретні технічні рішення.

4. Комбінація — це процес створення нового явного знання шляхом поєднання, систематизації та інтеграції вже наявної інформації. У будівництві цей процес

відображається у діяльності проєктних груп, які опрацьовують різні документи — технічні завдання, ескізи, робочі креслення, специфікації, умови контрактів. Завдяки об'єднанню цих елементів формується цілісна база знань, що використовується на подальших етапах реалізації проєкту.

Таким чином, процес створення й обміну знаннями у будівництві є циклічним і багаторівневим. Він поєднує індивідуальний досвід, колективну взаємодію та формалізовані знання, забезпечуючи постійне вдосконалення організаційної компетентності й підвищення якості проєктних рішень.

Знання, що використовуються у сфері будівництва, можна класифікувати на три основні категорії залежно від їх походження, способу зберігання та ролі у процесі реалізації проєктів.

1. Знання предметної області. Це базові знання, які формують загальний інформаційний контекст діяльності будівельних організацій. Вони охоплюють адміністративні дані (зокрема правила зонування, дозвільні процедури, норми планування), стандарти, технічні регламенти, специфікації матеріалів, бази даних продуктів тощо. Такі знання, як правило, є відкритими та доступними для всіх учасників ринку, а значна їх частина зберігається в електронних базах даних і галузевих реєстрах.

2. Організаційні знання. Це знання, притаманні конкретній компанії, які становлять її інтелектуальний капітал і визначають конкурентоспроможність на ринку. Вони можуть бути зафіксовані у внутрішніх документах, звітах або базах даних, а також існувати у неформальному вигляді — через компетенції, досвід і професійні зв'язки працівників. До цієї категорії належать також міжорганізаційні знання, пов'язані з налагодженням партнерських відносин із клієнтами, архітекторами, підрядниками, інжиніринговими фірмами та іншими учасниками будівельного процесу.

3. Проєктні знання. Це знання, що формуються безпосередньо під час реалізації конкретного проєкту та містять значний потенціал для повторного використання. Вони виникають у процесі взаємодії між різними учасниками — замовниками, підрядниками, проєктувальниками, інженерами тощо. Проте часто ці знання залишаються у неструктурованому вигляді — у вигляді досвіду, інтуїтивних рішень чи випадково виявлених помилок, що не фіксуються формально. Це призводить до того, що цінна інформація не використовується у подальших проєктах, а можливості для навчання організації залишаються обмеженими.

Після впровадження концепції управління знаннями у будівельній сфері дослідники почали активно вивчати, як саме ці процеси можна організувати в межах окремих проєктів із урахуванням специфіки галузі. Переважна більшість наукових праць була спрямована на аналіз управління знаннями в межах окремих організацій, де знання розглядаються як ключовий ресурс і форма інтелектуального капіталу. При цьому значна увага приділялася соціальним аспектам — процесам взаємодії, обміну досвідом, неформальним практикам навчання. Однак порівняно небагато досліджень фокусувалися на проблемі інтеграції знань у межах будівельних проєктів, що передбачає узгодження знань між різними організаціями, підрозділами та фахівцями.

У межах стратегічного партнерства передбачається, що всі учасники проєкту діятимуть на основі спільних принципів, обмінюючись знаннями, досвідом і напрацьованими практиками. Якщо визнати, що знання створюють додану вартість кінцевого продукту та є ключовим елементом конкурентоспроможності в ланцюжку

постачання, то дослідження процесів управління знаннями між учасниками проєкту стає важливою умовою підвищення ефективності всієї будівельної галузі. Такі підходи дають змогу краще зрозуміти механізми створення, передачі та накопичення знань, що у перспективі сприятиме оптимізації проєктної діяльності та розвитку інновацій у будівництві.

1.2. Концепція управління знаннями як детермінанта ефективності реалізації будівельних проєктів

З переходом до ринкових умов господарювання будівельна галузь зазнала суттєвих змін. Значно зросла кількість учасників інвестиційно-будівельного процесу, що призвело до ускладнення управлінських зв'язків та збільшення обсягів інформаційних потоків. Відповідно, посилюється їхній вплив на ефективність діяльності окремих підприємств і на результативність реалізації проєктів загалом. Незважаючи на наявність численних наукових досліджень, питання створення та розвитку інтегрованих систем у будівництві залишаються недостатньо висвітленими. Багато аспектів, пов'язаних із практичною реалізацією інтеграційних процесів, потребують подальшого дослідження та систематизації.

Інтеграційні процеси у сфері будівництва можна умовно поділити на дві основні групи:

- «Жорсткі» інтеграційні структури – це холдинги, концерни, конгломерати та інші великі корпоративні утворення, у межах яких підприємства функціонують як взаємопов'язані елементи єдиної системи. Такі об'єднання забезпечують централізоване управління, проте часто характеризуються складною організаційною структурою.

- «М'які» інтеграційні об'єднання – це асоціації, альянси, коаліції, які базуються на принципах партнерства та мережевої взаємодії. Вони відзначаються гнучкістю, автономністю учасників і здатністю швидко адаптуватися до змін зовнішнього середовища.

Крім цих двох основних типів, існують і проміжні форми інтеграції, які поєднують ознаки як жорстких, так і м'яких моделей. Такі форми дають змогу підприємствам досягати високого рівня координації дій без втрати самостійності, що є важливим для стабільного функціонування в умовах конкурентного ринку.

Більшість сучасних досліджень у цій сфері все ще зосереджені на аналізі класичних інтеграційних структур, таких як консорціуми, холдинги чи концерни. Проте ці моделі мають певні недоліки: складну систему управління, труднощі у координації дій між учасниками, а також обмежену здатність оперативно реагувати на зміни внутрішнього та зовнішнього середовища.

Подолати ці недоліки можливо шляхом упровадження нових, більш гнучких і технологічно орієнтованих форм співпраці між підприємствами. Такі підходи сприятимуть підвищенню ефективності управління, активізації інноваційної діяльності та забезпеченню сталого розвитку будівельної галузі в цілому [40].

У сучасних умовах розвитку будівельної галузі особливий інтерес викликає дослідження мережевих організаційних структур, що ґрунтуються на принципах партнерства та взаємовигідної співпраці між юридично самостійними підприємствами. Кожен учасник такої мережі, реалізуючи власні цілі та інтереси, одночасно сприяє

підвищенню загальної ефективності функціонування всієї системи. Саме тому зростає актуальність вивчення підходів, методів і моделей, які забезпечують створення дієвого організаційно-економічного механізму інтеграції будівельних підприємств у формі мереж.

Перевага формування ефективної системи взаємодії між будівельними підприємствами полягає у виникненні синергетичного ефекту — підвищення результативності спільної діяльності за рахунок системних властивостей нової структури, раціональнішого використання ресурсів та посилення інноваційного потенціалу.

Інтеграція підприємств у формі мереж являє собою відкриту, складну й динамічну систему з нелінійним характером розвитку. Вона передбачає наявність складних інституційних взаємозв'язків між учасниками та постійне пристосування до змін у зовнішньому середовищі. Мережі, що створюються для реалізації конкретних інвестиційно-будівельних проєктів, мають бути вертикально інтегрованими, оскільки їхня ефективність залежить від єдності цілей і технологічної взаємопов'язаності учасників. Вертикальна інтеграція дозволяє забезпечити координацію діяльності автономних, економічно самостійних підприємств через центральний керівний орган, який виконує функції стратегічного управління та контролю.

Аналіз наукових публікацій свідчить, що питання оцінювання ефективності мережевої інтеграції підприємств досі залишаються недостатньо опрацьованими. Зокрема, потребують подальшого дослідження критерії результативності взаємодії в межах мереж, методи математичного моделювання таких структур, а також підходи до прогнозування перспектив їх розвитку та оцінки економічних результатів функціонування інтегрованих систем.

Мережеві організаційні структури можуть мати різну конфігурацію, яка визначається складом і типом взаємозв'язків між учасниками. До їх складу можуть входити різноманітні елементи, що забезпечують оптимальний рівень співпраці. У кожному конкретному випадку мережа матиме свій унікальний набір учасників і форм взаємодії, що забезпечує найбільший синергетичний ефект. Підсумкові економічні результати залежать не лише від кількісного складу елементів, але й від якості, інтенсивності та характеру зв'язків між ними.

У науковій літературі мережеві структури розглядаються в межах кількох основних підходів:

- як форма взаємодії підприємств, які є юридично самостійними, але економічно взаємозалежними [23];
- як спосіб інтеграції підприємств через систему вертикальних і горизонтальних угод, контрактів і координаційних механізмів, що забезпечують спільну діяльність і залучення нових партнерів [290];
- як інституційна форма, що визначає правила взаємодії та інтеграції підприємств, які поділяють спільні економічні цінності, норми поведінки та принципи співпраці.

Проблематика формування та розвитку мережевих структур розглядається в межах кількох наукових підходів – теорії графів, теорії ігор та теорії нелінійної динаміки. Кожен із них по-своєму пояснює механізми взаємодії підприємств у межах мереж і закономірності їх еволюції.

З позицій теорії графів мережева структура описується як граф, що складається з вузлів і зв'язків між ними. У цьому випадку вузли відповідають окремим підприємствам, а зв'язки – різним видам взаємодії: фінансовій, матеріальній, ресурсній, соціальній чи

інформаційній [160]. Така система візуально нагадує павутину, у якій кожен елемент пов'язаний із кількома іншими, формуючи складну мережу відносин. У деяких випадках мережевий граф може мати центральну вершину, що виконує координаційну функцію, утворюючи деревоподібну структуру. Ієрархічна мережева система у цьому разі не передбачає жорсткого адміністративного підпорядкування, а функціонує за принципом «м'якого» моноцентризму, що базується на економічних та інформаційних зв'язках між підприємствами.

Теорія ігор трактує мережеві відносини як форму кооперативної взаємодії, де підприємства виступають «гравцями», які створюють коаліції для досягнення спільних цілей. Такі взаємодії регулюються узгодженими правилами, які визначають механізми розподілу вигоди між учасниками. Кожен учасник отримує частину спільного результату, що стимулює його подальшу участь у мережі. Хоча інтереси підприємств можуть відрізнятися, вони зазвичай не суперечать один одному, оскільки всі учасники зацікавлені у максимізації загального доходу мережі. Таким чином, мережеву структуру можна розглядати як кооперативну гру, у якій виграш залежить від ефективності взаємодії всіх її учасників.

У межах теорії нелінійної динаміки, яка досліджує процеси самоорганізації та синергетичні ефекти, мережа розглядається як відкрита, динамічна система. Її ефективність визначається взаємодією автономних, але взаємозалежних елементів, що створюють умови для виникнення синергетичного ефекту. За достатнього рівня свободи окремих підприємств така система забезпечує результат, який перевищує суму індивідуальних зусиль її учасників. Якщо ж інша форма інтеграції виявляється ефективнішою, мережева структура поступово втрачає стійкість і трансформується у нову, більш продуктивну форму співпраці.

Поєднання положень теорії графів, теорії ігор і теорії нелінійної динаміки дозволяє комплексно пояснити природу мережевих структур у будівництві, розкрити механізми їх розвитку та визначити чинники, що впливають на їх ефективність і стабільність.

Однак жодна з розглянутих теорій окремо не дає можливості повною мірою пояснити всі ефекти інтеграції, що виникають у результаті спільного впливу економічних, організаційних і соціальних чинників. Кожен підхід має односторонній характер аналізу, фокусуючись лише на окремих аспектах функціонування мереж. Це зумовлює потребу у формуванні узагальнюючої концепції, яка б поєднувала положення теорії графів, теорії ігор і теорії нелінійної динаміки, дозволяючи комплексно оцінювати закономірності формування, розвитку та ефективності мережевих структур.

Проблематика співпраці та інтеграції між учасниками будівельних проєктів привертала увагу науковців уже протягом кількох десятиліть. Mosey зазначає, що питання розмежування процесів проєктування та будівництва було визначене як одна з ключових проблем ще у 1962 році. У британських урядових галузевих звітах того періоду підкреслювалося, що поділ відповідальності між проєктувальниками та виконавцями часто призводить до зниження ефективності реалізації проєктів. Зокрема, було вказано, що проєктні методи, які не передбачають активної участі підрядників у ранніх стадіях розробки, підвищують ризики, послаблюють комунікацію між учасниками, спричиняють затримки, технічні помилки та навіть конфлікти у процесі будівництва [129].

Важливість інтеграційних процесів у будівництві підкреслювали також Songer і Chinowski, які розробили концепцію «матриці інтеграції» (рис. 1.4). Ця модель дозволяє

оцінювати рівень співпраці між учасниками будівельного проєкту залежно від двох ключових параметрів — ступеня довіри та інтенсивності комунікації [130].

«Матриця інтеграції» складається з чотирьох секторів, кожен з яких відображає певний рівень взаємодії між учасниками:

- перший сектор характеризує стан ізоляції, де спостерігається найнижчий рівень довіри та комунікації;

- другий сектор – це фрагментація, коли спілкування стає активнішим, але довіра між учасниками залишається низькою;

- третій сектор – об'єднання, у якому між учасниками проєкту існує взаємна довіра, однак інформаційні зв'язки залишаються слабкими.

Така модель дозволяє наочно визначати ступінь інтеграції між сторонами будівельного проєкту, виявляти слабкі місця у взаємодії та обґрунтовувати необхідність переходу до більш тісного співробітництва.

Найвищим рівнем у моделі є четвертий квадрат – стан інтеграції, який характеризується максимально високим рівнем довіри та ефективної комунікації між учасниками. Саме цей стан вважається найсприятливішим для спільної діяльності, оскільки забезпечує узгодженість дій, відкритий обмін знаннями та колективну відповідальність за результат. Автори підкреслюють, що будівельна команда у цьому випадку виступає не просто як сукупність окремих виконавців, а як інтегрована група, об'єднана спільними цілями та орієнтована на тривалу співпрацю в межах мережевої організаційної структури.

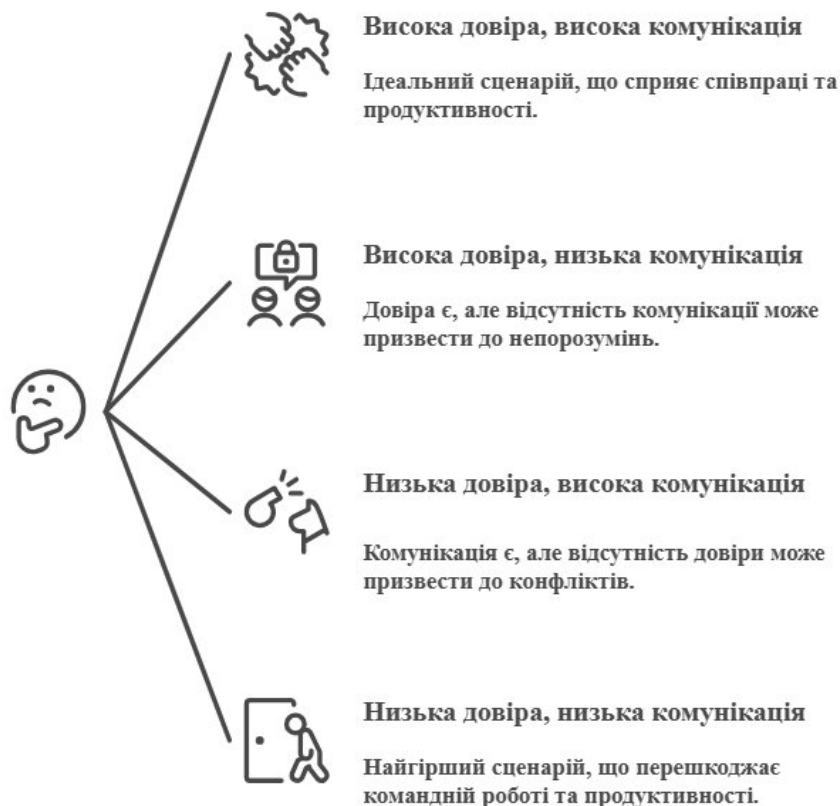


Рис. 1.4. Модель рівнів інтеграції (розроблено автором на основі [130])

Учасники такої команди формують взаємопов'язану мережу, в якій головним пріоритетом є створення довгострокових партнерських відносин, а не лише успішна реалізація окремого проекту. Такий підхід сприяє зміцненню довіри між сторонами, ефективнішому використанню ресурсів і накопиченню колективного досвіду, що може бути застосований у майбутніх проєктах.

На рисунку 1.5 представлено три рівні інтеграції у будівельній сфері, які відображають поступовий розвиток взаємодії між учасниками – від мінімального узгодження дій до повної гармонізації управлінських процесів.

Інтеграція в будівництві є не лише технічним або управлінським процесом, а стратегічною основою ефективної взаємодії, що забезпечує стабільний розвиток і підвищення конкурентоспроможності підприємств у мережевому середовищі.

Загалом, інтегрована система управління являє собою об'єднання двох або більше взаємопов'язаних підсистем, які функціонують у єдиному управлінському контурі. Такі системи поєднують у собі політики, процедури та інструменти управління якістю, охороною навколишнього середовища, охороною праці, здоров'ям і безпекою з метою комплексного підвищення ефективності діяльності підприємства. Вони відображають прагнення компанії не лише забезпечити стабільну якість продукції або послуг, але й покращувати екологічні показники, знижувати ризики для здоров'я працівників і підвищувати рівень безпеки виробництва [242].



Рис. 1.5. Рівні узгодженості та взаємодії у будівельній сфері
(розроблено автором на основі [242])

У сучасних умовах господарювання рішення щодо інтеграції суб'єктів ринкових відносин набуває стратегічного значення, оскільки воно здатне суттєво змінити конкурентні позиції підприємства на ринку. Інтеграційний процес передбачає формування нових підсистем, створення взаємозв'язків між ними та розроблення механізмів координації дій. У результаті такої взаємодії виникає нова синергетична складова, яка й

визначає основний ефект інтеграції. Саме синергетичний ефект є головною метою об'єднання підприємств і відображає ту додану вартість, що виникає внаслідок спільного функціонування.

Наявність синергії означає, що сукупний результат діяльності інтегрованої структури перевищує суму результатів окремих підприємств, які працювали самостійно до об'єднання. Ступінь вираженості цього ефекту безпосередньо характеризує ефективність інтеграційного процесу: чим більший синергетичний ефект, тим успішніше відбувається інтеграція.

Разом з тим, ефективність реалізації інтеграційних процесів значною мірою залежить від того, наскільки раціонально організовано управління різними формами взаємодії між будівельними підприємствами. У деяких випадках результати об'єднання можуть бути неоднозначними або навіть негативними, якщо потенціал співпраці бізнес-одиниць використовується не повною мірою. Це може призвести до втрати ефективності, дублювання функцій, зростання управлінських витрат або неузгодженості дій між учасниками.

У ситуаціях, коли інтеграція не забезпечує очікуваних результатів, особливої актуальності набуває вдосконалення методичних підходів до управління інтегрованими структурами. Розроблення ефективного механізму управління дозволяє підвищити узгодженість дій між учасниками, посилити використання синергетичного потенціалу й забезпечити сталий розвиток інтегрованих систем у будівельній галузі.

Факт існування мережевої структури можна встановити, виходячи з характеру господарських зв'язків між підприємствами. Саме наявність стійких, взаємозалежних відносин між суб'єктами господарювання дає підстави говорити про формування мережевої організації. Водночас у межах інвестиційно-будівельного комплексу така взаємодія здебільшого не має формального юридичного оформлення — між підприємствами відсутні елементи участі в капіталі, передача майнових прав чи створення спільних юридичних осіб. Тому ключовим критерієм ідентифікації мережевих структур виступають саме функціональні зв'язки, які формуються в процесі спільної діяльності.

Кожне підприємство, що бере участь у такій взаємодії, визначаючи свою стратегію розвитку, прагне досягти максимального економічного результату, зберігаючи при цьому незалежність та управлінську автономію. У цьому контексті мережевий ефект має особливу природу, яка відрізняє його від звичайного ефекту об'єднання підприємств. На відміну від інтегрованих структур «жорсткого» типу, мережеві об'єднання не зменшують витрат на управління чи адміністративний апарат, адже кожна компанія зберігає власну організаційну структуру [29].

Однак справжня перевага мережевої моделі полягає в появі нової динамічної взаємодії між учасниками — синергетичного ефекту. Його сутність полягає у тому, що скоординована діяльність декількох незалежних підприємств забезпечує результат, вищий за суму ефектів їхньої індивідуальної роботи. Це досягається завдяки обміну знаннями, оптимізації інформаційних потоків, підвищенню узгодженості дій і швидкості прийняття рішень.

Таким чином, мережеві зв'язки у будівельній сфері слід розглядати не як формальне об'єднання підприємств, а як гнучку форму співпраці, де взаємодія виступає джерелом доданої вартості. Саме ця форма організації дозволяє зберігати підприємствам

автономність, але водночас досягати спільних результатів, що перевищують ефективність їх окремої діяльності.

Інтеграційні процеси в будівельній галузі розглядаються сучасною науковою думкою як системоутворюючий чинник підвищення ефективності інвестиційно-будівельних проєктів. У контексті концепції управління знаннями інтеграція виступає не лише організаційною або економічною категорією, а й формою акумулювання, синтезу та трансферу знань між учасниками складних інженерних систем. Традиційна модель фрагментованого будівництва, де кожен суб'єкт виконував ізольовану функцію, поступово втрачає ефективність у зв'язку з високим рівнем технологічної складності проєктів, потребою в цифровій координації процесів і зростанням вимог до якості та сталості. На цій основі інтеграція набуває рис не просто організаційного узгодження, а інтелектуально-комунікативної взаємодії, де основною цінністю стає знання як стратегічний ресурс.

У наукових дослідженнях з менеджменту будівництва інтеграційні процеси класифікують за рівнем жорсткості управлінських зв'язків, ступенем централізації прийняття рішень і формою координації знань між учасниками. Так, виділяють жорстку інтеграцію, яка передбачає повне об'єднання функцій у межах єдиного організаційного контура, м'яку інтеграцію, засновану на партнерстві та обміні інформацією без злиття структур, і гібридні моделі, що поєднують централізоване управління з автономністю окремих учасників. У будівельній практиці це відповідає переходу від традиційної контрактної системи до партнерських моделей типу Design-Build (DB), Engineering Procurement Construction (EPC) та Integrated Project Delivery (IPD).

Історично жорсткі форми інтеграції були властиві індустріальному періоду розвитку галузі, коли управління будівництвом здійснювалося централізовано державними або корпоративними структурами. Модель, близька до вертикальної інтеграції, дозволяла контролювати весь цикл — від проєктування до введення в експлуатацію, але обмежувала інноваційність та гнучкість. У сучасних умовах цифрової економіки перевагу отримують мережеві або адаптивні структури, які характеризуються децентралізацією та високим рівнем обміну знаннями. Це зумовлено тим, що створення вартості у будівництві нині залежить від спільної інтелектуальної діяльності, а не лише від матеріальних активів.

Значний внесок у теоретичну систематизацію форм інтеграції зробили представники ресурсної теорії підприємства, які розглядали інтеграцію як процес комбінування унікальних компетенцій і знань, що створюють конкурентну перевагу [90]. Ці ідеї пізніше були адаптовані до будівельної галузі у працях Eriksson (2015) і Bygballe & Jahre (2009), які доводили, що рівень інтеграції прямо впливає на здатність організації до навчання, інновацій і зниження транзакційних витрат. У цьому контексті жорсткі моделі інтеграції ефективні при великих проєктах із високим рівнем стандартизації, тоді як м'які або мережеві структури краще підходять для інноваційних, унікальних або багатопрофільних об'єктів [51].

Сутність інтеграції в будівництві можна розглядати також через призму теорії транзакційних витрат, відповідно до якої вибір форми взаємодії між суб'єктами визначається балансом між витратами на координацію і контролем та вигодами від спільної діяльності. Жорсткі інтеграційні структури забезпечують низький рівень невизначеності, але потребують високих управлінських витрат. Навпаки, м'які

партнерські форми характеризуються гнучкістю, однак несуть ризики розмиття відповідальності. Сучасна тенденція полягає у формуванні динамічних гібридних моделей, де ключову роль відіграє цифрова платформа обміну знаннями (BIM, ERP, CDE), яка мінімізує інформаційну асиметрію між учасниками проєкту [265].

Варто також відзначити, що у зарубіжній літературі інтеграція часто ототожнюється із “collaborative governance” — спільним управлінням, де межі між організаціями стають умовними. В українських реаліях такі форми лише починають формуватись у межах консорціумів або державно-приватного партнерства, проте вже демонструють підвищення ефективності через оптимізацію потоків інформації [38].

На основі узагальнення наукових підходів і практичного досвіду можна сформулювати типологію форм інтеграції, представлену в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Типологія інтеграційних структур у будівництві
(розроблено автором на основі [38])

Тип інтеграції	Ключові характеристики	Переваги	Обмеження	Приклади застосування
Жорстка (вертикальна)	Повна централізація управління; єдина юридична особа; інтеграція фінансів, ресурсів і відповідальності	Високий рівень контролю, стабільність, передбачуваність	Високі адміністративні витрати, низька гнучкість, слабка інноваційність	Державні корпорації, великі генпідрядники
М'яка (мережева)	Автономія учасників; партнерство на договірній основі; обмін інформацією без юридичного об'єднання	Гнучкість, інноваційність, адаптивність до змін	Ризики розмиття відповідальності, складність координації	Консорціуми, тимчасові об'єднання учасників проєкту
Гібридна (адаптивна)	Поєднання централізованого управління з самостійністю учасників; використання цифрових платформ	Збалансованість контролю і гнучкості; ефективний обмін знаннями	Потреба у високому рівні цифрової зрілості організацій	Проекти на основі BIM, IPD, PPP-моделі
Інтегрована інноваційна (цифрова)	Використання інформаційних моделей, штучного інтелекту, аналітики великих даних	Максимальна прозорість і узгодженість дій; прогнозування ризиків і витрат	Високі інвестиції у цифровізацію; потреба в зміні управлінської культури	Smart Construction, Digital Twin Projects

Як свідчить аналіз, класифікація форм інтеграції в будівельній галузі відображає еволюцію від ієрархічних до мережевих моделей управління, у яких ключовим активом стає не матеріальний ресурс, а інформація й знання. З цієї точки зору, інтеграція — це не стільки економічне об'єднання, скільки когнітивно-комунікаційна взаємодія, що базується на цифрових технологіях. Саме тому сучасні підходи до управління проектами розглядають BIM не лише як технічний інструмент, а як інтеграційний механізм, який забезпечує міжорганізаційне навчання.

Таким чином, сучасна будівельна інтеграція — це багаторівнева система, що об'єднує фінансові, технологічні, інформаційні та знаннєві потоки між організаціями. Вона формує синергетичний ефект, який полягає у зменшенні транзакційних витрат, прискоренні процесів прийняття рішень та підвищенні інноваційної спроможності галузі. Перехід від лінійної до інтегрованої моделі будівельного виробництва означає зміну самої парадигми управління — від ієрархічного контролю до мережевої координації знань, що базується на спільній відповідальності, відкритості та довірі.

Управління знаннями в сучасних мережевих організаціях будівельної галузі набуває ключового значення, оскільки саме знання стають основним інтеграційним ресурсом і джерелом конкурентних переваг. Будівельні проекти, що реалізуються у форматі консорціумів, кластерів чи партнерських мереж, характеризуються складністю, багатоетапністю й участю численних суб'єктів, об'єднаних не вертикальними, а горизонтальними зв'язками.

Початкові теоретичні засади концепції управління знаннями сформувалися на перетині когнітивної, організаційної та інформаційної теорій. Ще у 1990-х роках дослідники Ікуджіро Нонака та Хіротакі Такеучі запропонували модель SECI (Socialization – Externalization – Combination – Internalization), яка пояснює, як знання циркулюють у межах організації. Ця модель виявилася особливо релевантною для будівельних мереж, де значна частина компетенцій є неформалізованою — вони передаються через спільну практику, комунікацію та колективне навчання.

На відміну від промислового виробництва, у будівництві знання часто контекстуальні, пов'язані з конкретним об'єктом, територією, технологією, культурою взаємодії. Саме тому управління ними потребує не лише технічних, а й соціально-комунікативних механізмів.

Важливою умовою ефективного функціонування мережевих структур є створення спільного знаннєвого простору, який забезпечує безперервний обмін інформацією між учасниками різних рівнів — інвесторами, проектувальниками, підрядниками, постачальниками, експлуатантами. У цьому середовищі знання виконують функцію «сполучної тканини» між організаціями, формуючи когнітивну синергію. У роботах Davenport і Prusak (1998) підкреслюється, що управління знаннями — це не лише технічна діяльність, а й культурна трансформація, спрямована на створення довіри та готовності до обміну інформацією.

У контексті будівельної галузі механізми управління знаннями можна умовно поділити на структурні, технологічні та поведінкові. Структурні механізми включають формування організаційних умов для циркуляції знань — створення навчальних спільнот, проектних офісів, центрів компетенцій. Технологічні механізми охоплюють використання цифрових платформ — BIM, PLM, ERP, CDE, які забезпечують інтеграцію інформаційних

потоків. Поведінкові механізми базуються на розвитку комунікаційних навичок, культури довіри та колективного навчання.

Особливої уваги заслуговує роль цифрових платформ у побудові механізмів управління знаннями. Інформаційне моделювання (BIM) виступає тут як «інфраструктура пам'яті» мережевої організації. Усі рішення, зміни, проєктні параметри фіксуються в цифровій моделі, яка стає не лише технічним інструментом, а й базою знань, що зберігає досвід колективної діяльності. Цю властивість добре описує концепція Organizational Memory System, де наголошується, що організаційна пам'ять може існувати у вигляді матеріальних об'єктів, процедур, документів і технологічних артефактів.

Водночас мережевий характер будівельних проєктів створює складність у тому, що знання не належать одній організації, а розподілені між кількома незалежними учасниками. Тому постає завдання створення інтеропераційного середовища обміну знаннями, яке б забезпечувало сумісність даних, стандартів і протоколів взаємодії. Цю проблему активно досліджували Grant (1996), Tsoukas (2009), Spender (1996), які наголошували, що ключовим механізмом інтеграції знань є не стільки накопичення інформації, скільки створення спільного контексту — «shared understanding», у якому знання набувають колективного сенсу.

У практиці сучасного управління проєктами важливу роль відіграє поєднання формальних та неформальних механізмів обміну знаннями. Формальні механізми представлені базами даних, стандартами ISO 19650, процедурами контролю версій, корпоративними порталами. Неформальні ж включають міжособистісні контакти, спільні воркшопи, “lessons learned sessions”, комунікації у командах. За даними досліджень Hossain, Chua & Rahman (2020), ефективність управління знаннями у будівельних мережах зростає на 25–40%, коли організаційна культура сприяє відкритості та взаємній підтримці.

Сутність механізмів управління знаннями полягає також у циклічності процесу створення та трансформації знань. Нонака визначає його як безперервну спіраль, у якій знання переходять від неявних до явних форм і навпаки. У будівництві цей цикл набуває особливої форми: досвід робітників, інженерів, архітекторів — неявні знання — фіксуються у цифрових моделях (явні знання), які потім аналізуються, модифікуються й знову стають частиною практичного досвіду на нових об'єктах. Таким чином, мережеве управління знаннями є не стільки централізованим процесом, скільки самоорганізованою системою обміну досвідом, що розвивається за принципом зворотного зв'язку.

Значний внесок у розроблення підходів до управління знаннями у мережевих структурах зробила теорія динамічних здібностей, згідно з якою здатність організації до інтеграції, побудови та перебудови компетенцій є джерелом довготривалої конкурентної переваги. Для будівельних підприємств це означає, що ефективність управління знаннями визначається не лише наявністю інформаційних систем, а й умінням швидко навчатися, адаптуватися й створювати нові знання в умовах змін.

Серед сучасних моделей управління знаннями у будівництві варто відзначити концепції Collaborative Knowledge Networks (CKN) та Integrated Project Knowledge Management (IPKM). Перша підкреслює важливість побудови горизонтальних зв'язків між учасниками проєкту, друга — інтеграцію знань у процесах BIM-моделювання, аналізу життєвого циклу (LCA) і управління активами (FM). У цих моделях центральним елементом виступає інформаційна модель будівлі як середовище акумуляції, передачі та трансформації знань.

Загалом механізми управління знаннями в мережевих структурах будівельної галузі можна описати через чотири взаємопов'язані рівні: технологічний (інструменти і платформи), організаційний (структури і процеси), когнітивний (навички і компетенції) та культурний (цінності та поведінкові норми). Їх взаємодія формує стійку систему, у якій знання не втрачаються під час зміни учасників або завершення проєкту, а трансформуються у форму колективної пам'яті [157].

Виходячи з проведеного аналізу, механізми управління знаннями в мережевих організаціях доцільно розглядати як багаторівневу систему, де взаємодіють технологічні, організаційні, когнітивні та культурні компоненти. Кожен із них формує власний рівень впливу на ефективність обміну інформацією та розвитку компетенцій учасників проєкту. Для узагальнення цієї структури та виявлення взаємозв'язків між різними рівнями подано таблицю 1.3 «, яка систематизує основні інструменти, зміст і очікувані результати їх застосування.

Можна стверджувати, що механізми управління знаннями в мережевих структурах будівництва формують інтелектуальну основу інтеграції, яка забезпечує безперервність знань, їх збереження і трансфер між проєктами та поколіннями фахівців. В умовах цифрової економіки ці механізми стають фундаментом сталого розвитку галузі, сприяють підвищенню її конкурентоспроможності та створюють умови для переходу до моделі «розумного будівництва» (Smart Construction), де знання перетворюються на стратегічний актив.

Таблиця 1.3.

Механізми управління знаннями у мережевих організаціях будівельної галузі
(розроблено автором на основі [157])

Рівень механізму	Зміст та інструменти	Очікуваний ефект
Технологічний	Використання BIM, ERP, PLM, CDE, баз даних знань, аналітики великих даних	Централізоване зберігання та доступ до актуальної інформації, зменшення втрат знань
Організаційний	Центри компетенцій, спільноти практики, мережеві структури управління, процеси “lessons learned”	Підвищення узгодженості рішень, формування міжорганізаційних стандартів
Когнітивний	Розвиток професійних компетенцій, навчальні програми, менторинг, міжпрофесійна комунікація	Зростання рівня експертизи, інноваційна активність
Культурний	Формування довіри, командна робота, мотивація до обміну знаннями, відкритість	Зниження опору змінам, підвищення залученості персоналу

Оцінювання ефективності інтегрованих систем управління у будівельній галузі є однією з найскладніших і водночас найважливіших аналітичних проблем сучасного менеджменту. У традиційному розумінні ефективність у будівництві вимірюється через економічні показники — собівартість, терміни, якість і прибутковість. Однак у контексті інтегрованих структур ці параметри не відображають усього спектра взаємодії між організаціями, оскільки інтеграція передбачає не лише економічну, а й когнітивну, інформаційну та соціальну складові. Тому сучасна наукова думка схиляється до розуміння

ефективності як комплексного багатовимірного явища, у якому поєднуються техніко-економічні, організаційні, поведінкові та знаннєві параметри.

Теоретичне підґрунтя для формування системи показників ефективності інтегрованого управління було закладене у працях Kaplan & Norton (1992) через модель Balanced Scorecard (BSC), що дозволяє оцінювати результативність організації за чотирма напрямками: фінанси, клієнти, внутрішні процеси, навчання та розвиток. У контексті будівельної галузі цю модель було адаптовано низкою дослідників (Love, Irani & Edwards, 2004; El Asmar et al., 2013), які запропонували включити до неї показники, пов'язані з координацією між учасниками, ефективністю обміну знаннями, рівнем довіри, швидкістю прийняття рішень і ступенем цифрової зрілості проєкту.

У наукових працях Eriksson (2015), Meng (2019) та Hwang & Ng (2013) інтегровані системи управління визначаються як сукупність взаємопов'язаних процесів, які функціонують на основі спільних інформаційних ресурсів і синхронізованих управлінських рішень. Відтак, показники ефективності мають не лише відображати досягнуті результати, а й оцінювати ступінь взаємодії, адаптивності та навчання системи. Це зумовило появу підходів до оцінки інтеграційної та когнітивної ефективності, що базуються на кількісних та якісних метриках.

Одним із найбільш поширених підходів у міжнародній практиці є концепція Key Performance Indicators (KPI), яку адаптували до потреб інтегрованих проєктних команд. Дослідження показало, що ефективність інтегрованих систем визначається не лише об'єктивними фінансовими результатами, а й тим, наскільки ефективно здійснюється координація між суб'єктами мережі. Наприклад, вартість інформаційних помилок, конфліктів чи затримок може бути співмірною із 5–10% загального бюджету проєкту. Тому одним із ключових показників стає індекс узгодженості комунікацій (Communication Alignment Index, CAI), який оцінює рівень гармонізації інформаційних потоків у межах інтегрованої системи [124].

Паралельно з KPI у сучасних дослідженнях з'явилися підходи, що базуються на теорії стейкхолдерів (Freeman, 1984), де ефективність визначається не лише за економічними, а й за соціально-комунікаційними критеріями. У цьому аспекті важливими є такі параметри, як рівень задоволеності замовників, ступінь довіри між партнерами, якість взаємодії між учасниками проєкту. Інтегровані системи передбачають, що успіх одного учасника не може бути досягнутий за рахунок інших, тому вимірювання ефективності має відображати баланс інтересів усіх сторін.

Окремого значення набуває поняття цифрової ефективності (Digital Efficiency Index, DEI), яке відображає ступінь використання цифрових технологій для підтримки управління знаннями, планування, контролю та аналітики. У дослідженнях було доведено, що перехід на інтегровані цифрові платформи (BIM, ERP, CDE) дозволяє знизити адміністративні витрати на 20–25% та підвищити точність прогнозування вартості будівництва на 15–18%. Водночас сам рівень цифрової інтеграції може бути показником зрілості системи управління знаннями [220].

У практиці управління будівельними проєктами показники ефективності інтегрованих систем дедалі частіше об'єднуються у мультидименсійну матрицю оцінювання, де поєднуються традиційні економічні метрики з якісними характеристиками взаємодії. Зокрема, у методології IPD (Integrated Project Delivery) виділяють три взаємопов'язані блоки оцінювання: Project Performance (результати проєкту), Team

Performance (ефективність команди) та Learning Performance (результати навчання). Саме останній компонент — навчання — розглядається як ключовий індикатор розвитку інтегрованої системи, адже здатність до колективного навчання безпосередньо визначає її стійкість у довгостроковій перспективі.

На рівні державного управління інтегровані показники ефективності набувають форми індексів сталого розвитку. Так, у багатьох країнах запроваджено системи оцінювання ефективності будівельних проєктів за критеріями ESG (Environmental, Social, Governance). Для інтегрованих систем управління ці параметри означають, що результативність вимірюється не лише через фінансову рентабельність, а й через соціальну відповідальність, рівень екологічної безпеки, прозорість управлінських процедур. Сукупність показників, що найчастіше застосовується у практиці оцінювання інтегрованих систем управління в будівництві, узагальнено в таблиці 1.4.

Наукові дослідження показують, що оцінка ефективності інтегрованих систем управління має враховувати чотири групи показників: результативні (outputs), процесні (processes), поведінкові (behavioral) та навчальні (learning indicators). Такий підхід забезпечує комплексність вимірювання і дозволяє виявити взаємозв'язок між якістю управління знаннями та економічними результатами. Згідно з моделлю Anantatmula (2008), успішність інтегрованих проєктів безпосередньо корелює з рівнем прозорості комунікацій, частотою обміну знаннями і ступенем довіри між учасниками.

Таблиця 1.4.

Система показників ефективності інтегрованих систем управління у будівництві
(розроблено автором на основі [220])

Група показників	Основний зміст	Приклади ключових метрик	Очікуваний результат
Економічні	Вартість, продуктивність, рентабельність, ефективність використання ресурсів	Собівартість проєкту, ROI, NPV, IRR, коефіцієнт освоєння бюджету	Зниження витрат, збільшення прибутковості
Процесні	Ефективність координації, комунікацій, контролю якості	Індекс узгодженості комунікацій (CAI), рівень відповідності графіку, частка виконаних завдань у термін	Підвищення точності планування, зменшення затримок
Поведінкові	Ступінь довіри, задоволеність учасників, колаборація	Індекс довіри (TI), індекс залученості команди (TEI), кількість спільних рішень	Покращення командної взаємодії, зниження конфліктів
Цифрові	Рівень використання ІТ, BIM, автоматизації	Індекс цифрової зрілості (DMI), відсоток процесів у CDE, рівень інтегрованості	Зростання швидкості обміну даними, скорочення інформаційних втрат
Навчальні	Розвиток компетенцій, накопичення знань, інновації	Кількість впроваджених lessons learned, рівень повторного використання знань	Підвищення інноваційності, стійкість організації

Застосування багатовимірної системи показників дозволяє формувати інтегральний індекс ефективності (Integrated Efficiency Index – IEI), який узагальнює результати функціонування системи за всіма вимірами.

Таким чином, оцінка ефективності інтегрованих систем управління у будівництві повинна базуватись на принципі збалансованості: економічна результативність може бути досягнута лише за умови високої взаємодії, цифрової інтеграції та спільного навчання учасників. Високий рівень узгодженості процесів і комунікацій, підкріплений спільною базою знань, формує синергетичний ефект, який забезпечує стійкий розвиток будівельних організацій у довгостроковій перспективі.

1.3. Сутність і структура когнітивних механізмів у процесах прийняття управлінських рішень

Основною метою інноваційного розвитку будівельної галузі є формування стійких конкурентних переваг у довгостроковій перспективі, які забезпечують створення безпечного, енергоефективного та комфортного середовища життєдіяльності людини відповідно до сучасних світових стандартів якості. Такий розвиток є ключовою передумовою сталого соціально-економічного поступу країни. Досягнення стратегічних переваг має ґрунтуватися на інноваційному переоснащенні галузі, упровадженні передових технологій управління життєвим циклом будівельних об'єктів, розвитку інжинірингових компетенцій і застосуванні цифрових рішень. Використання інформаційних технологій сприяє підвищенню продуктивності праці, скороченню енергоємності та матеріалоємності будівельних процесів, а також зниженню собівартості готової продукції [247].

Будівельна галузь є одним із ключових секторів національної економіки, який відіграє визначальну роль у створенні, розвитку та модернізації інфраструктури країни. Її ефективне функціонування безпосередньо впливає на діяльність більшості інших галузей і підприємств, формуючи основу економічної стабільності та соціального добробуту.

Водночас інноваційний розвиток будівництва стикається з рядом системних проблем. Серед них — технологічна відсталість, фрагментованість ринку та закритість галузі, що обмежують можливості підвищення її конкурентоспроможності. Ці чинники проявляються у дефіциті висококваліфікованих фахівців та інженерно-технічного персоналу, низькому рівні інвестиційної активності, інформаційній непрозорості, а також у невідповідності будівельних процесів міжнародним стандартам.

Додатковими стримуючими факторами є недостатня кількість потужних будівельних компаній, здатних забезпечити повний цикл виробництва — від проектування до експлуатації об'єктів, а також слабка взаємодія між науковими установами та бізнесом у сфері трансферу технологій. Обмежене впровадження інноваційних рішень і низький рівень комерціалізації наукових розробок призводять до уповільнення модернізаційних процесів у будівництві, що вимагає формування ефективної державної політики підтримки інноваційного розвитку галузі [143].

Сьогодні будівельна галузь традиційно відноситься до низько- або середньотехнологічних секторів економіки, що зумовлює недостатню увагу до інновацій та науково-технічного розвитку порівняно з високотехнологічними сферами. Водночас саме будівництво має вагоме значення для національної економіки, оскільки забезпечує

інфраструктурну основу для функціонування більшості інших галузей. Тому перехід будівельної галузі до високотехнологічного рівня може стати потужним драйвером економічного зростання як самої галузі, так і країни в цілому.

Необхідність технологічного оновлення будівельного комплексу зумовлена посиленням глобальної конкуренції, прискоренням інноваційно-технологічних процесів і тенденцією до реіндустріалізації світової економіки. Сучасні виклики вимагають запровадження новітніх технологій у сфері виробництва будівельних матеріалів, енергозбереження, підвищення енергоефективності та екологічної безпеки. Інноваційний розвиток у цих напрямках є необхідною умовою формування стратегічних конкурентних переваг на світовому ринку будівельних послуг.

Однією з характерних рис сучасного будівельного сектору, як в Україні, так і за кордоном, залишається його консерватизм і низька швидкість упровадження технологічних новацій. За рівнем інноваційної активності будівництво посідає одне з останніх місць серед провідних галузей світової економіки. У спеціальній літературі навіть утвердився термін «неповоротка галузь» (*laggard industry*), який відображає повільну реакцію підприємств на технологічні зміни.

Цей стан пояснюється насамперед низьким рівнем інвестицій у науково-дослідні роботи. Згідно з даними Міністерства енергетики США, будівельні компанії інвестують у розвиток інновацій лише 0,3–0,4 % від загального обсягу продажів, тоді як середній показник для інших промислових галузей становить 3–4 %. Подібна ситуація спостерігається і в більшості країн Західної Європи [14].

Для підвищення конкурентоспроможності будівельного комплексу необхідно активізувати інноваційну діяльність, стимулювати інвестиції у дослідження та розробки, розвивати партнерство між бізнесом, науковими установами та державними структурами. Саме ці заходи здатні забезпечити перехід галузі до високотехнологічної моделі розвитку та зміцнити її роль у національній економіці.

Варто зазначити, що наведена характеристика не в повній мірі відображає реальну картину інноваційних процесів у будівельній галузі. Значна частина технологічних новацій, які впроваджуються в сучасне будівництво, зазвичай не є результатом внутрішніх розробок самої галузі. Більшість нових рішень надходить із суміжних сфер — таких як металургія, хімічна, деревообробна промисловість чи машинобудування. Іншими словами, будівництво часто виступає не генератором, а споживачем інновацій, пристосовуючи до власних потреб технології, які вже пройшли апробацію в інших секторах економіки.

Втім, навіть з урахуванням цього факту оцінка будівельної галузі як такої, що характеризується низьким рівнем інноваційної активності, залишається цілком виправданою. Її консерватизм має низку об'єктивних причин. Передусім, тривалі строки експлуатації споруд роблять будь-які технологічні експерименти надзвичайно ризикованими. Нові матеріали чи технології потребують багаторічної перевірки, оскільки навіть незначні помилки, виявлені після завершення будівництва, можуть мати серйозні економічні та соціальні наслідки [3].

Ще однією причиною обережності є високий рівень відповідальності за безпеку об'єктів. Будівельна діяльність безпосередньо впливає на життя та здоров'я людей, тому будь-яке нововведення сприймається з підвищеною обережністю. Неправильне впровадження технології або недосконале проєктне рішення може створити загрозу для

користувачів об'єкта, що зумовлює стриману позицію підприємств щодо застосування інноваційних підходів.

Проте ситуація в галузі поступово змінюється. За останнє десятиліття спостерігається поступова трансформація будівництва під впливом глобальних цифрових тенденцій, посилення конкуренції та потреби у підвищенні ефективності. Галузь, яка довгий час залишалася інертною, тепер вимушена переглядати свої підходи та впроваджувати нові технологічні рішення.

Інтеграція BIM та інших цифрових інструментів у процеси управління будівництвом, використання автоматизованих систем планування, аналітичних платформ і штучного інтелекту вже сьогодні докорінно змінюють підходи до реалізації проєктів. У найближчі десятиліття очікується глибока трансформація не лише організаційних і технологічних процесів, а й самої сутності будівельного виробництва — від методів зведення споруд до використання нових матеріалів і принципів екологічного проєктування [34].

Термін BIM (Building Information Modeling — інформаційне моделювання будівель) з'явився у професійному середовищі відносно недавно, хоча сама концепція, що лежить в його основі, почала формуватися ще задовго до появи цього визначення. Ідея створення цифрової моделі будівлі, яка містить повну інформацію про її структуру, властивості та функціонування, бере свій початок у 1980-х роках — періоді активного розвитку систем автоматизованого проєктування (CAD).

Протягом наступних десятиліть термін BIM не мав усталеного тлумачення та вживався для позначення різних напрямів розвитку комп'ютерного проєктування. На ранніх етапах він асоціювався переважно з тривимірною візуалізацією будівельних об'єктів, збагаченою додатковими характеристиками, такими як об'єми матеріалів, геометричні властивості чи параметри окремих елементів. Відмінність цього підходу полягала в тому, що модель почала розглядатися не лише як графічне зображення, а як носій комплексної інформації, де поєднано геометричні, конструктивні, інженерні й експлуатаційні дані.

Концептуальним ядром BIM є принцип об'єктно-орієнтованого параметричного моделювання. Його сутність полягає у створенні моделі, в якій усі елементи мають власні властивості, логічні зв'язки та реагують на зміни в реальному часі. Це робить інформаційну модель динамічною системою, що постійно оновлюється, на відміну від традиційних CAD-програм, які працюють лише з фіксованими кресленнями. Параметричне моделювання дозволяє автоматизувати більшість рутинних операцій, підвищити точність проєктних рішень і забезпечити тісну інтеграцію між архітекторами, інженерами та підрядниками.

Розвиток технологій автоматизованого проєктування, відображений на рис. 1.6, був зумовлений необхідністю ефективної роботи з дедалі більшими обсягами технічної та проектної інформації. Саме це сприяло появі спеціалізованих систем управління даними про виріб (PDM — Product Data Management) і створенню електронних архівів, які забезпечували централізований доступ до технічної документації. У подальшому ці рішення стали підґрунтям для формування концепції управління життєвим циклом продукту (PLM — Product Lifecycle Management), що передбачає комплексне управління всіма етапами існування об'єкта — від розроблення концепції до експлуатації й утилізації [105].

У будівництві ситуація принципово інша. Тут поняття життєвого циклу безпосередньо пов'язане з конкретним об'єктом — будинком або спорудою, який створюється в єдиному екземплярі. Тому підхід BIM зосереджується не на серійному відтворенні, а на комплексному управлінні всіма стадіями існування конкретної будівлі — від проєктування, будівництва і введення в експлуатацію до технічного обслуговування та модернізації.

На рисунках 1.7 і 1.8 представлено порівняльне бачення життєвого циклу продукту та будівлі відповідно до концепцій PLM і BIM. В обох випадках ключовим елементом є наявність єдиної цифрової моделі, яка супроводжує об'єкт на всіх етапах його існування — від створення концепції до експлуатації. Така модель формується і зберігається у спеціалізованих середовищах CAD і PDM систем, що забезпечують узгодженість усіх даних про об'єкт [371].

У машинобудуванні головна увага зосереджується не на кожному окремому виробі, а на його моделі, яка використовується для серійного виробництва. Концепція PLM орієнтована саме на тиражування продукції, тому термін «життєвий цикл» у цьому контексті стосується не конкретного екземпляра, а узагальненої цифрової моделі. Експлуатаційні властивості окремого виробу є лише одним із аспектів управління життєвим циклом, але не його головним змістом.

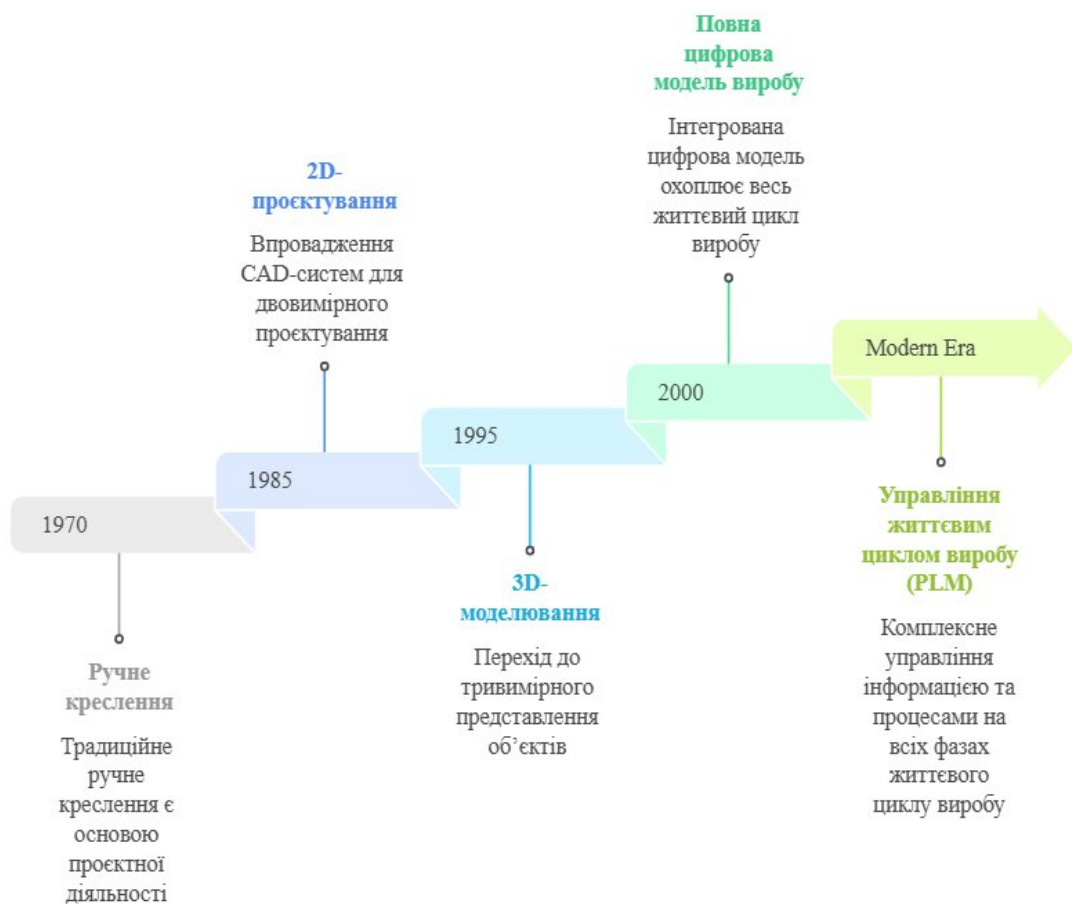


Рис. 1.6. Розвиток засобів автоматизованого проєктування
(розроблено автором на основі [371])

Основна економічна віддача від будівлі формується не на етапі її зведення, а під час експлуатації, яка може тривати десятки років. Саме в цей період будівля приносить стабільний дохід власнику, виступаючи не лише як фізичний об'єкт, а як довгостроковий актив. Використання інформаційної моделі в процесі експлуатації забезпечує можливість ефективного управління ресурсами, контролю витрат, своєчасного проведення ремонтних робіт і модернізацій, а також оптимізації функціонування інженерних систем. Така модель дозволяє вести точний облік матеріалів, платежів, технічного обслуговування та оперативно оновлювати інформацію про стан об'єкта [322].

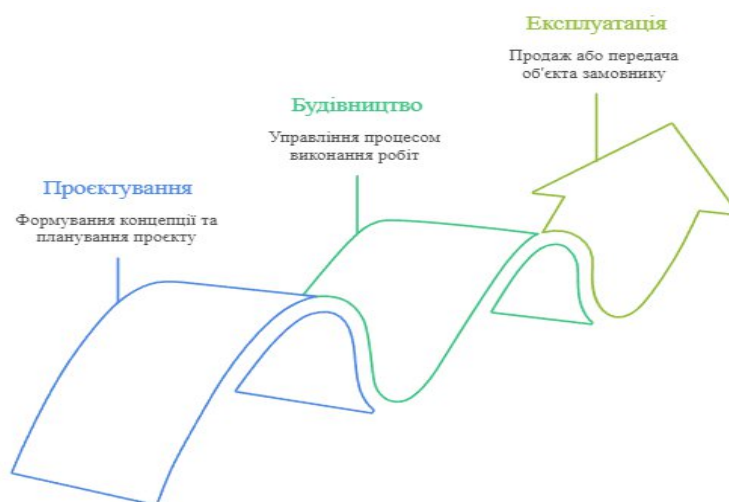


Рис. 1.7. Етапи життєвого циклу продукту в межах концепції PLM
(розроблено автором на основі [371])



Рис. 1.8. Етапи життєвого циклу будівлі в межах концепції BIM
(розроблено автором на основі [371])

Для реалізації цих завдань використовуються спеціалізовані програмні рішення, які інтегруються з BIM-моделлю і вибірково працюють з необхідними даними, формуючи цифрову основу для управління експлуатацією будівель. Таким чином, інформаційне моделювання не завершується на етапі проєктування чи будівництва — воно триває протягом усього життєвого циклу об'єкта, підтримуючи прийняття рішень і формуючи базу для подальшого вдосконалення експлуатаційних параметрів.

Технології параметричного моделювання, які спочатку були розроблені для машинобудування, сьогодні активно адаптуються до потреб будівельної галузі. Вони дозволяють підвищувати точність проєктування, скорочувати витрати та значно збільшувати продуктивність праці. Цифровізація процесів будівництва поступово змінює його структуру — від етапів планування до управління готовими об'єктами [315].

Для систематизації переваг, які забезпечує застосування BIM у різних фазах життєвого циклу будівель, доцільно узагальнити їх у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5.

Ключові переваги BIM на різних етапах життєвого циклу будівлі
(розроблено автором на основі [315])

Етап життєвого циклу	Основні можливості BIM	Очікувані результати
Проектування	Створення параметричної моделі будівлі, інтеграція архітектурних, конструктивних і інженерних рішень	Підвищення точності проєктних даних, зменшення кількості помилок і колізій
Будівництво	Візуалізація процесів, координація учасників, контроль строків і кошторисів	Зниження витрат, скорочення термінів реалізації, підвищення якості робіт
Експлуатація	Управління технічним станом будівлі, облік витрат і ресурсів, планування ремонтів	Оптимізація витрат на утримання, підвищення довговічності об'єкта
Модернізація та реконструкція	Аналіз поточного стану, моделювання змін, прогнозування ефектів від оновлень	Зменшення ризиків, ефективне управління інвестиціями в оновлення
Утилізація / демонтаж	Планування демонтажу з урахуванням матеріалів і екологічних аспектів	Безпечне проведення робіт, повторне використання ресурсів

Швидке поширення інноваційних і розумних технологій у сучасному світі закономірно призводить до аналогічних тенденцій у будівництві. Очевидно, що найближчим часом саме BIM-технології стануть ключовим інструментом інтеграції процесів проєктування, реалізації та експлуатації будівельних інвестицій. Перші наукові основи інформаційного моделювання у будівництві були закладені ще у 1975 році професором Чарльзом Істменом, який розробив концепцію «Building Description System» — прототип сучасного BIM [219].

У 1986 році британський дослідник Роберт Ейш уперше ввів у науковий обіг термін «Building Modeling», який він трактував як інформаційне моделювання будівель. Учений сформулював основні принципи інформаційного підходу до проєктування, наголошуючи на тому, що майбутнє галузі полягає у використанні цифрових моделей, здатних

поєднувати в собі геометричні, технічні, конструктивні й часові параметри об'єкта. Серед ключових засад, визначених Ейшем, можна виокремити такі:

- тривимірне представлення об'єкта замість традиційних креслень;
- автоматичне формування проєктної документації на основі сукупності параметрів моделі;
- інтелектуальна параметризація елементів будівлі;
- створення баз даних, що описують усі об'єкти будівництва;
- поділ процесу реалізації об'єкта на послідовні часові етапи.

Згодом сформувалися й основні переваги застосування BIM, які визначають його відмінність від традиційних методів проєктування. Вони зведені у таблицю 1.6.

Таблиця 1.6.

Основні переваги застосування BIM у будівельному проєктуванні
(розроблено автором на основі [219])

№	Перевага	Характеристика / Очікуваний результат
1	Скорочення термінів проєктування	Завдяки автоматизації обчислень, оновленню даних у реальному часі та швидкому узгодженню змін між учасниками
2	Зменшення витрат на реалізацію проєкту	Зниження помилок у проєктній документації, оптимізація використання матеріалів і трудових ресурсів
3	Підвищення продуктивності праці	Спрощений доступ до даних і швидке отримання необхідної інформації для прийняття рішень
4	Покращення процесів узгодження документації	Автоматична перевірка сумісності проєктних рішень та усунення колізій між інженерними системами
5	Доступність актуальної інформації про виробників і матеріали	Можливість інтеграції баз даних постачальників, підрядників та технічних характеристик
6	Кількісна оцінка та підтримка тендерних процедур	Формування кошторисів, розрахунок обсягів матеріалів і трудових витрат для прозорого оцінювання пропозицій

Період кінця 1970-х — початку 1980-х років став відправною точкою для розвитку концепції інформаційного моделювання, яка майже одночасно формувалася в США та Європі. У США для позначення цієї ідеї використовували термін «Building Product Model», а в Європі — «Product Information Model». В обох випадках наголос робився на понятті Product, що підкреслювало фокус дослідників на самому об'єкті проєктування, а не лише на процесі його створення.

Розвиток інформаційного моделювання у подальшому став можливим завдяки активній діяльності провідних світових компаній — Autodesk, Bentley Systems, Graphisoft, Nemetschek та Tekla, які створили перші програмні платформи, здатні реалізувати концепцію BIM на практиці. Завдяки їхнім розробкам абревіатура BIM набула широкого поширення в усьому світі та стала стандартом цифрового проєктування [104]. Саме в цей період розпочався перший етап упровадження BIM у діяльність проєктних організацій, а проєктувальники стали справжніми «піонерами» у застосуванні цієї інноваційної технології, заклавши основу сучасного підходу до управління інформацією в будівництві.

Для глибшого розуміння сутності інформаційного моделювання доцільно проаналізувати наявні визначення поняття BIM. Інформаційна модель будівлі

розглядається як комплексна, структурована та чисельно описана система даних, що містить усю інформацію про об'єкт і використовується на всіх етапах його життєвого циклу — від проєктування до демонтажу. Вона об'єднує технічні, економічні, правові, експлуатаційні та екологічні характеристики будівлі, забезпечуючи їх узгодженість, повноту та доступність для всіх учасників процесу [84].

Інформаційна модель будівлі має низку ключових властивостей: вона є узгодженою і взаємопов'язаною, піддається аналітичним розрахункам, має чітку геометричну прив'язку, легко інтегрується у цифрові середовища та передбачає можливість постійного оновлення даних. Це дозволяє BIM виступати не лише інструментом для проєктування, але й універсальною платформою управління всіма процесами, пов'язаними з життєвим циклом будівлі.

Інформаційна модель може використовуватися на різних етапах — від прийняття проєктних рішень і розроблення документації до прогнозування експлуатаційних характеристик об'єкта, складання кошторисів, планування будівельних робіт, управління процесом зведення та подальшої експлуатації будівлі. Крім того, BIM застосовується для управління реконструкцією, модернізацією чи знесенням будівель, а також у сфері комерційної експлуатації нерухомості.

BIM — це цифрове представлення об'єкта, яке охоплює всі етапи його життєвого циклу. В основі технології лежить концепція єдиного інформаційного простору, що містить дані про технічні, правові, енергетичні, екологічні та економічні параметри будівлі. Завдяки високому рівню деталізації та точності моделі, BIM-технологія дозволяє проводити складні аналітичні розрахунки — зокрема, з енергоефективності, вогнестійкості, довговічності та міцності конструкцій, — що створює надійну основу для прийняття технічно обґрунтованих управлінських рішень [362].

Інформаційне моделювання у будівництві розглядається як сучасний організаційно-технологічний підхід, що охоплює всі етапи життєвого циклу об'єкта — від проєктування до експлуатації та утилізації. Сутність цього підходу полягає у комплексному зборі, систематизації та обробці всієї технічної, конструктивної, технологічної, економічної та іншої інформації про об'єкт із врахуванням усіх її зв'язків і залежностей. Такий підхід дозволяє розглядати будівлю разом із усіма пов'язаними елементами як єдиний інтегрований об'єкт управління, що забезпечує цілісність процесів і підвищує ефективність реалізації проєкту.

Інформаційне моделювання будівлі, своєю чергою, є технологією оптимізації процесів проєктування та будівництва. В її основі лежить створення єдиної цифрової моделі будівлі, яка використовується всіма учасниками інвестиційно-будівельного процесу на всіх його етапах — від початкових концептуальних ескізів до експлуатації готового об'єкта. Це забезпечує безперервний обмін даними між архітекторами, інженерами, підрядниками, інвесторами та експлуатуючими організаціями, що мінімізує ризики неузгодженості, зменшує кількість помилок і скорочує загальні витрати часу та ресурсів.

У більш широкому розумінні BIM розглядається не лише як технологія, а як комплексна система управління знаннями, інформацією та співпрацею між усіма учасниками будівельного проєкту. Grilo і Jardim-Goncalves визначають BIM як сукупність взаємопов'язаних політик, процедур і технологій, які підтримують усі процеси життєвого циклу будівлі та забезпечують інтеграцію інформаційних потоків між усіма командами,

здіяними у проєкті [107]. Основна перевага BIM полягає у створенні спільного інформаційного середовища, що забезпечує ефективну комунікацію, обмін даними та колективне прийняття рішень на всіх рівнях управління [122].

Проведений аналіз наукових джерел дає змогу дійти висновку, що поняття BIM варто розглядати багатокomпонентно, чітко розрізняючи три взаємопов'язані, але різні аспекти:

- Building Information Model — безпосередньо цифрова модель будівлі, що містить усі необхідні параметри об'єкта;

- Building Information Modeling — процес створення, використання та оновлення цієї моделі протягом усього життєвого циклу будівлі;

- Building Information Management — система організаційного управління інформаційними потоками та взаємодією учасників будівництва.

Враховуючи результати досліджень, опублікованих у звіті Building SMART International, можна уточнити зміст трьох взаємопов'язаних складових концепції BIM, що відображають її різні рівні застосування — модель, процес та систему управління [70].

Building Information Model — це цифровий опис усіх фізичних і функціональних характеристик споруди, який містить комплекс даних про її конструкцію, матеріали, інженерні системи та експлуатаційні властивості. Така модель є надійним джерелом знань для всіх учасників інвестиційно-будівельного процесу і використовується для прийняття обґрунтованих рішень на всіх етапах реалізації проєкту — від створення концепції до демонтажу будівлі.

Building Information Modeling визначається як творчий процес створення, наповнення, використання та постійного оновлення цифрової моделі об'єкта. Цей процес забезпечує безперервну генерацію і доступність даних для всіх сторін, залучених до проєктування, будівництва й експлуатації споруди, сприяючи тісній співпраці, зменшенню кількості помилок і підвищенню ефективності робіт на всіх етапах життєвого циклу [15].

Building Information Management — це система організації, координації та контролю інвестиційно-будівельного процесу, що базується на використанні параметрів цифрової моделі будівлі. Вона забезпечує ефективний обмін інформацією між усіма учасниками, підвищує прозорість процесів і якість управлінських рішень. Завдяки BIM-менеджменту створюються такі ефекти, як централізований доступ до даних, покращена візуальна комунікація через тривимірні об'єкти, раннє виявлення потенційних ризиків і можливостей, підтримка інтерактивного та міждисциплінарного проєктування, контроль у процесі виконання робіт, а також своєчасна актуалізація всієї проєктної та експлуатаційної документації.

Процес прийняття управлінських рішень у сучасному будівництві є складним когнітивним явищем, що поєднує раціональні, інтуїтивні та адаптивні аспекти мислення. На відміну від традиційних економічних моделей, які розглядали рішення як результат логічного зіставлення варіантів, когнітивний підхід акцентує на обмеженості людських можливостей у сприйнятті, обробці й аналізі інформації. Це особливо важливо в умовах цифрової трансформації будівельної галузі, коли управлінські рішення приймаються на основі великих масивів даних, отриманих із BIM, ERP, PLM та аналітичних систем. Ефективність таких рішень залежить не лише від якості інформації, а й від того, як саме керівник її інтерпретує, систематизує і трансформує у дію.

Концепція обмеженої раціональності пояснює, що управлінські рішення ніколи не є абсолютно логічними, адже ухвалюються в умовах обмеженого часу, неповної інформації та наявності когнітивних викривлень. У будівництві це проявляється особливо гостро: будь-який проєкт є унікальним, залежить від численних технічних, правових і соціально-економічних чинників, тому керівники змушені шукати не оптимальні, а практично доцільні варіанти. Такі рішення базуються не лише на аналізі даних, а й на досвіді, інтуїції, здатності розпізнавати закономірності у складних середовищах.

Сучасні дослідження когнітивної поведінки доводять, що процес прийняття рішень часто відбувається не за логікою максимізації вигоди, а шляхом спрощення, коли інформаційне навантаження компенсується використанням евристик — інтелектуальних скорочень, які дозволяють швидше орієнтуватися у складній ситуації. У будівельному управлінні такі механізми можуть проявлятися у швидкому виборі підрядника, прийнятті компромісних рішень або прогнозуванні термінів без глибокого аналізу всіх змінних. Ці когнітивні скорочення не завжди ведуть до помилок — навпаки, у динамічному середовищі вони забезпечують швидкість реакції, особливо коли рішення ґрунтується на професійному досвіді.

Когнітивний підхід виділяє кілька базових моделей управлінського мислення. Раціональна модель розглядає процес прийняття рішень як послідовне збирання й аналіз інформації з метою вибору найкращого варіанту. Модель обмеженої раціональності пояснює, що в реальності керівники задовольняються рішенням, яке є достатньо ефективним за наявних умов. Інтуїтивна модель ґрунтується на розпізнаванні ситуацій і відчуттях, що виникають із професійного досвіду. Адаптивна когнітивна модель передбачає використання навчальних механізмів, аналітичних інструментів і цифрових платформ для постійної корекції управлінських дій. Усі ці підходи співіснують у сучасному будівництві, утворюючи складну систему, де рішення формуються через поєднання логіки, інтуїції й цифрової аналітики.

У практиці будівельного менеджменту рішення рідко ухвалюються лінійно чи одномірно. Керівник проєкту комбінує аналітичні методи з інтуїтивним сприйняттям ризику, співвідносить кількісні показники з особистими судженнями. Наприклад, при формуванні календарного графіка він використовує автоматизовані інструменти планування, але остаточне рішення часто залежить від попереднього досвіду виконання подібних об'єктів. Таке поєднання аналітичного і емпіричного компонентів називають когнітивним гібридизмом. Саме в цій комбінації проявляється гнучкість мислення керівника — здатність адаптувати раціональні схеми до реальних обставин.

Важливою особливістю когнітивного підходу є уявлення про процес прийняття рішень як про динамічний і контекстуальний феномен, який залежить від ситуації. У будівництві рішення не є універсальними — вони завжди визначаються специфікою проєкту, його географічними умовами, культурою організації, рівнем цифровізації. Тому моделі прийняття рішень у цій сфері потребують гнучкості, адаптивності та здатності до навчання. Сучасні системи підтримки рішень у будівництві вже не лише надають дані, а й допомагають інтерпретувати їх, створюючи інтелектуальні поради, прогнозуючи ризики та пропонуючи сценарії реагування.

Розвиток технологій призвів до формування нової парадигми когнітивного управління, коли керівник взаємодіє з цифровими системами не як із пасивними інструментами, а як із партнерами у процесі мислення. Інформаційні моделі будівельних

об'єктів, аналітичні панелі та симуляційні середовища створюють середовище когнітивної підтримки, яке підсилює аналітичні здібності людини. У цьому контексті роль управлінця трансформується: він стає не лише приймачем інформації, а й архітектором когнітивних сценаріїв, що визначають траєкторію розвитку проєкту.

Когнітивна модель прийняття рішень у будівництві має також соціально-комунікаційний вимір. Рішення рідко є індивідуальними — вони формуються у колективному середовищі, де важливими є узгодженість бачень, довіра та розуміння спільної мети. Цифрові платформи управління проєктами сприяють формуванню колективної когнітивної системи, у межах якої відбувається обмін інформацією, знаннями та судженнями. Таке середовище створює передумови для зменшення невизначеності та підвищення якості рішень.

Водночас когнітивні процеси в управлінні не позбавлені обмежень. Типовими помилками є надмірна впевненість у власних оцінках, схильність ігнорувати альтернативні варіанти, прив'язка до попередніх рішень і схильність до надмірної оптимізації. У будівельних проєктах це може проявлятися у недооцінці ризиків, невірному прогнозуванні витрат або переоцінці темпів виконання робіт. Тому однією з ключових компетенцій сучасного управлінця стає метакогнітивна здатність — уміння аналізувати власне мислення, розпізнавати помилки й своєчасно коригувати їх [253].

Для систематизації основних підходів до прийняття управлінських рішень у будівництві, а також для узагальнення їхніх відмінностей за характером мислення, умовами застосування та практичними обмеженнями, нижче наведено таблицю 1.7.

Таблиця 1.7.

Порівняльна характеристика когнітивних моделей прийняття управлінських рішень
(розроблено автором на основі [253])

Тип когнітивної моделі	Характерні ознаки	Сфера застосування у будівництві	Основні обмеження
Раціональна	Послідовний логічний аналіз альтернатив, прийняття рішень на основі об'єктивних критеріїв	Стратегічне планування, розподіл ресурсів, формування бюджетів	Повільність процесу, висока залежність від повноти даних
Обмежено-раціональна	Орієнтація на “достатньо хороше” рішення за умов невизначеності	Управління проєктами в умовах обмежень часу й ресурсів	Імовірність когнітивних викривлень, евристичність
Інтуїтивна	Використання досвіду, розпізнавання ситуацій і патернів	Реакція на нештатні події, оцінка ризиків, оперативне управління	Суб'єктивність суджень, залежність від досвіду керівника
Адаптивна / когнітивно-цифрова	Поєднання аналітики, навчання й цифрових інструментів	Управління складними проєктами, моделювання сценаріїв, BIM	Високі вимоги до цифрової зрілості організації
Колективна / мережна	Спільне прийняття рішень у цифровому середовищі, узгодженість знань	Координація команд у CDE, інтегровані контракти IPD, PPP	Розмиття відповідальності, комунікаційні ризики

Сучасні концепції когнітивного управління розглядають процес прийняття рішень не як одноразовий акт, а як безперервний цикл навчання, прогнозування й зворотного зв'язку. Ефективна організація здатна вчитися на власному досвіді, коригувати стратегії й постійно оновлювати когнітивні моделі поведінки. У будівництві це проявляється у впровадженні систем аналізу завершених проєктів, де помилки та успіхи перетворюються на джерело нових знань. Такий підхід сприяє формуванню адаптивної культури мислення, яка забезпечує гнучкість і стійкість у мінливому середовищі.

Управління сучасними будівельними проєктами вимагає від керівників не лише високого рівня технічної грамотності, а насамперед сформованих когнітивних компетенцій — здатності мислити системно, аналізувати великі обсяги інформації, приймати рішення в умовах невизначеності та координувати знання між численними учасниками. У складних інфраструктурних системах, де проєкти реалізуються за участю багатьох підрядників, цифрових платформ і партнерських структур, когнітивні компетенції стають вирішальним чинником управлінської ефективності. Вони формують основу не лише індивідуальної компетентності керівника, а й колективного інтелекту проєктної організації.

Когнітивні компетенції визначаються як сукупність знань, навичок, ментальних стратегій і установок, що забезпечують ефективну обробку, інтерпретацію та використання інформації для прийняття рішень. Це поняття тісно пов'язане з управлінським мисленням, критичним аналізом, емоційним інтелектом і здатністю до метапізнання — усвідомлення власних процесів мислення. Для будівельної галузі це означає вміння керівника працювати з багатовимірною інформацією, оцінювати взаємозв'язки між технічними, фінансовими, правовими та соціальними аспектами проєкту.

Класичні моделі компетентності у менеджменті виокремлюють технічні, міжособистісні й концептуальні навички. Проте у сучасному будівництві цього поділу недостатньо, адже когнітивна складова пронизує всі три групи. Технічна компетентність без когнітивної гнучкості перетворюється на механічне виконання процедур; міжособистісна — без когнітивної емпатії втрачає здатність до розуміння контексту; концептуальна — без аналітичного мислення втрачає стратегічну глибину. Таким чином, когнітивна компетентність виконує інтегративну функцію, поєднуючи знання, досвід та інтуїцію в єдину систему управлінського мислення.

Особливе значення когнітивних компетенцій проявляється у будівельних проєктах з високим рівнем технологічної складності, де потрібно швидко синтезувати дані з різних джерел — креслень, моделей, кошторисів, графіків, нормативів. У таких умовах керівник має вміти не лише інтерпретувати технічні параметри, а й усвідомлювати, як зміни в одному компоненті впливають на всю систему. Ця здатність отримала назву системного мислення. Вона забезпечує бачення об'єкта як цілісної структури, у якій технічні рішення тісно пов'язані з економічними та соціальними наслідками.

Важливою складовою когнітивної компетентності є здатність до аналітичної реконструкції інформації — вміння виділяти суттєве з масиву даних, узагальнювати і трансформувати його у знання, придатні для управлінських дій. У будівельному менеджменті це проявляється у роботі з інформаційними моделями (BIM), де потрібно не лише читати дані, а й бачити закономірності, прогнозувати наслідки рішень, виявляти

ризика. Таке мислення є багат шаровим: воно поєднує логічний аналіз, просторове бачення, стратегічну інтуїцію та досвід минулих проєктів.

У цифрову епоху когнітивні компетенції розвиваються на перетині технологій і гуманітарних навичок. Керівник має не просто користуватися цифровими інструментами, а мислити через них, сприймати дані як засіб побудови знань. Це означає перехід від інструментального використання інформаційних систем до когнітивного — коли технології стають продовженням аналітичного мислення. Цей тип управлінського мислення називають когнітивно-цифровим, і він передбачає тісну взаємодію між людиною та технологічним середовищем.

Когнітивна компетентність також проявляється в етичному та соціальному аспектах управління. Успішний керівник у будівництві має вміти координувати інтереси різних учасників — замовника, підрядника, проєктанта, експлуатанта — і приймати рішення, які не лише економічно доцільні, а й соціально відповідальні. Для цього потрібне вміння співпереживати, прогнозувати реакції, аналізувати не лише цифри, а й поведінку людей. Таким чином, когнітивна компетентність стає не лише інтелектуальною, а й соціально-комунікативною категорією.

Одним із ключових вимірів когнітивної компетентності є здатність до рефлексії — усвідомлення власного процесу мислення, розпізнавання помилок, переоцінка стратегій. У складних будівельних проєктах, де рішення часто мають відкладений ефект, така здатність є запорукою мінімізації помилок. Керівник, здатний до рефлексії, створює культуру навчання в організації, де досвід стає джерелом постійного вдосконалення.

Когнітивні компетенції мають також колективний вимір. У сучасному будівництві управлінські рішення приймаються не ізольовано, а колегіально — у цифрових середовищах спільної роботи. Це передбачає колективне мислення, узгодження моделей сприйняття та створення спільної когнітивної бази. У таких умовах важливою стає здатність керівників координувати не лише дії, а й способи мислення учасників команди. У цьому сенсі когнітивна компетентність перетворюється на навичку фасилітації колективного інтелекту.

Розвиток когнітивних компетенцій відбувається через навчання, практику та взаємодію. Ефективні організації будівельного сектору створюють середовище, у якому знання циркулюють, а керівники набувають досвіду через участь у міжпрофесійних командах. Особливо важливо формувати вміння працювати в умовах інформаційного перевантаження, коли здатність швидко виділяти суттєве та ігнорувати другорядне визначає успіх. Навчання у таких системах має бути не лише технічним, а й когнітивним — орієнтованим на розвиток мислення, а не лише навичок.

Розвиток когнітивної компетентності керівників у будівельній галузі безпосередньо пов'язаний із рівнем цифрової зрілості організації. Там, де існують інструменти збору, аналізу та візуалізації даних, управлінці отримують можливість не лише приймати рішення на основі фактів, а й розвивати мислення на основі моделей. Цифрові середовища сприяють формуванню нових когнітивних звичок: бачити систему цілісно, мислити сценарно, прогнозувати наслідки.

Важливим аспектом є також управління когнітивним навантаженням. У великих будівельних проєктах обсяг інформації, що надходить до керівника, може перевищувати його можливості до обробки. Тому ефективне управління знаннями передбачає використання візуальних і когнітивно-дружніх інструментів — інформаційних панелей,

симуляційних моделей, аналітичних карт. Це не лише зменшує перевантаження, а й оптимізує спосіб мислення, роблячи процес прийняття рішень більш прозорим і передбачуваним.

Для узагальнення ключових когнітивних компетенцій, що визначають ефективність діяльності керівників у будівельних проєктах, а також для систематизації способів їх формування в умовах цифрової трансформації галузі, нижче наведено таблицю 1.8, яка відображає основні напрями розвитку управлінського мислення та практичні механізми їх реалізації [359].

Таблиця 1.8.

Когнітивні компетенції керівників будівельних проєктів і механізми їх формування
(розроблено автором на основі [359])

Категорія компетенцій	Зміст і прояв у практиці управління	Механізми формування
Аналітичні	Здатність системно мислити, аналізувати складні ситуації, прогнозувати наслідки рішень	Участь у стратегічному плануванні, аналіз проєктних даних, використання цифрової аналітики
Інтуїтивні	Розпізнавання закономірностей і ризиків на основі досвіду	Практичний досвід у багатопрофільних командах, симуляційні навчання
Рефлексивні	Усвідомлення власного мислення, аналіз управлінських помилок	Постпроєктний аналіз, наставництво, культура зворотного зв'язку
Комунікативні	Здатність координувати команди, узгоджувати інтереси учасників	Розвиток емоційного інтелекту, фасилітаційні методики, колективне навчання
Цифрово-когнітивні	Використання інформаційних технологій як інструменту мислення	Навчання роботі з BIM, ERP, аналітичними системами, інтеграція даних у процеси прийняття рішень

Когнітивна компетентність керівника визначає не лише якість окремого рішення, а й стійкість усієї системи управління. Організації, де керівники володіють розвиненими когнітивними навичками, здатні краще реагувати на кризи, швидше адаптуватися до змін, ефективніше управляти інноваціями. Саме тому розвиток таких компетенцій розглядається як стратегічне завдання для сучасних будівельних компаній.

Таким чином, когнітивні компетенції керівників є ключовою умовою ефективності систем управління будівництвом. Вони забезпечують не лише здатність ухвалювати якісні рішення, а й створюють передумови для організаційного навчання, інновацій та сталого розвитку. У майбутньому саме ці компетенції визначатимуть, наскільки швидко й гнучко будівельна галузь зможе адаптуватися до нових технологічних і соціальних викликів.

1.4. BIM-технології як інформаційна основа когнітивного простору будівельного проєкту

Сучасний світ перебуває у стані постійних змін, що зумовлює появу та стрімкий розвиток нових концепцій, методів і технологій. Центральне місце серед них посідають системи, спрямовані на ефективну роботу з великими обсягами даних. Якщо раніше використання великих даних (Big Data) вважалося прерогативою ІТ-компаній, то сьогодні

ця концепція активно впроваджується в усіх сферах людської діяльності — від економіки та освіти до управління інфраструктурними й будівельними проєктами.

В умовах цифрової трансформації підприємства збирають, накопичують і аналізують величезні масиви інформації, що генеруються щоденно. Такі дані охоплюють інформацію про клієнтів, постачальників, матеріальні ресурси, технологічні процеси, ризики тощо. Саме на основі цих даних формується новий рівень управління, що спирається на аналітичні інструменти, машинне навчання та когнітивні технології.

У будівельній галузі ключову роль у формуванні когнітивного простору відіграють BIM-технології (Building Information Modeling) — системи моделювання інформації про будівлю. Вони дозволяють поєднувати різноманітні дані про об'єкт (архітектурні, конструктивні, технологічні, фінансові) в єдиному цифровому середовищі, забезпечуючи узгодженість і прозорість усіх процесів життєвого циклу проєкту — від проєктування до експлуатації [357].

Поєднання Big Data і BIM створює основу для побудови когнітивного простору будівельного проєкту — інтелектуального інформаційного середовища, яке підтримує прийняття рішень, прогнозування, оптимізацію процесів та управління ризиками. Така інтеграція дозволяє формувати «цифрові двійники» об'єктів, що постійно оновлюються завдяки потокам даних із сенсорів, звітів, постачальницьких систем і користувацьких платформ.

Для кращого розуміння масштабів і напрямів застосування великих даних у сучасному світі, у тому числі в контексті BIM-технологій, наведено узагальнену класифікацію (табл. 1.9).

Таблиця 1.9.

Приклади використання великих даних у різних сферах діяльності *(розроблено автором на основі [357])*

№	Сфера застосування	Приклад використання	Очікувані результати
1	Комерційний сектор	Аналіз поведінки споживачів через системи на кшталт Google AdSense	Оптимізація реклами, персоналізація пропозицій
2	Фінанси	Прогнозування динаміки ринку, оцінка кредитних ризиків	Зменшення збитків, підвищення точності фінансових прогнозів
3	Державне управління	Виявлення шахрайських схем, контроль публічних фінансів	Підвищення ефективності антикорупційних заходів
4	Освіта	Аналіз даних масових онлайн-курсів (МООС)	Підвищення якості навчального процесу, адаптація програм
5	Будівництво	Інтеграція BIM і Big Data для створення «цифрових двійників» об'єктів	Оптимізація витрат, прогнозування термінів, зниження ризиків
6	Охорона здоров'я	Обробка клінічних даних і моніторинг пацієнтів	Персоналізована медицина, рання діагностика

Поєднання великих даних із BIM-технологіями створює підґрунтя для розвитку інтелектуальних систем управління будівельними проєктами. Це не лише підвищує якість прийняття рішень, але й формує новий підхід до управління інформаційними потоками,

який базується на аналізі, прогнозуванні та когнітивній взаємодії між усіма учасниками проєкту.

На сучасному етапі розвитку цифрового суспільства обсяг даних, що генерується людською діяльністю, зростає в геометричній прогресії. Лише за кілька років сукупна кількість цифрової інформації перевищила показники попередніх десятиліть. Така динаміка зумовлена стрімким розвитком інформаційних технологій, поширенням мобільних пристроїв, сенсорних мереж, «інтернету речей» (IoT), а також збільшенням швидкості передачі даних і доступності хмарних обчислень [2].

У результаті організації стикаються з новим викликом — необхідністю не лише накопичення, але й раціональної обробки великих даних (Big Data) для отримання практичних знань, що сприяють прийняттю ефективних управлінських рішень. Процес обробки даних передбачає багаторівневу взаємодію:

- збір даних із різних внутрішніх і зовнішніх джерел;
- очищення, фільтрацію та уніфікацію інформаційних потоків;
- аналітичну обробку з використанням методів машинного навчання та штучного інтелекту;
- синтез результатів із наявними корпоративними знаннями;
- формування когнітивної бази знань, яка підтримує управлінські рішення, планування та прогнозування в межах будівельного проєкту.

Результати численних наукових досліджень підтверджують, що аналітика великих даних створює додану вартість для організацій, оскільки сприяє підвищенню продуктивності, ефективності процесів та якості управління. Незважаючи на відносну новизну цього напрямку, зростає кількість успішних кейсів, у яких використання великих даних забезпечило перехід від інтуїтивного управління до раціонального, доказового прийняття рішень [256].

Використання Big Data має два основні виміри вигод: економічний і соціальний.

1. Економічні переваги виражаються у зростанні конкурентоспроможності підприємства, підвищенні продуктивності праці, оптимізації ресурсів і процесів. Застосування аналітичних інструментів дозволяє підприємствам:
 - зменшувати ризики,
 - прогнозувати поведінку ринку,
 - формувати ефективні бізнес-моделі,
 - підвищувати точність стратегічного планування [46].

Отже, великі дані стають каталізатором економічної стійкості та адаптивності підприємства [49].

2. Соціальні вигоди від використання великих даних не менш значущі. Їх аналітика дозволяє вирішувати комплексні суспільні проблеми — від охорони здоров'я та освіти до екологічного моніторингу та забезпечення національної безпеки. Дані високої роздільної здатності застосовуються у:
 - дослідженнях ракових захворювань,
 - боротьбі з тероризмом,
 - прогнозуванні кліматичних змін,
 - розвитку дистанційної освіти.

На відміну від економічних вигод, які формують нові знання для організацій, соціальні переваги зосереджені на створенні нової цінності для людини і суспільства, сприяючи інтелектуальному розвитку та безпеці.

У контексті будівельної галузі використання великих даних у поєднанні з BIM-технологіями відкриває можливість формування когнітивного простору, у якому інформація перетворюється на знання, а знання — на стратегічні рішення. Цей підхід відображено на рисунку 1.9, що демонструє багаторівневу структуру перетворення даних у знання та вигоди.

Подальший розвиток цифровізації будівельної галузі зумовив необхідність переходу від класичних підходів управління до інтелектуально орієнтованих моделей, заснованих на аналізі великих даних та когнітивних технологіях. В основі цих процесів лежить інтеграція BIM-технологій, Big Data та штучного інтелекту (AI) у єдину інформаційну систему управління проектом [67].

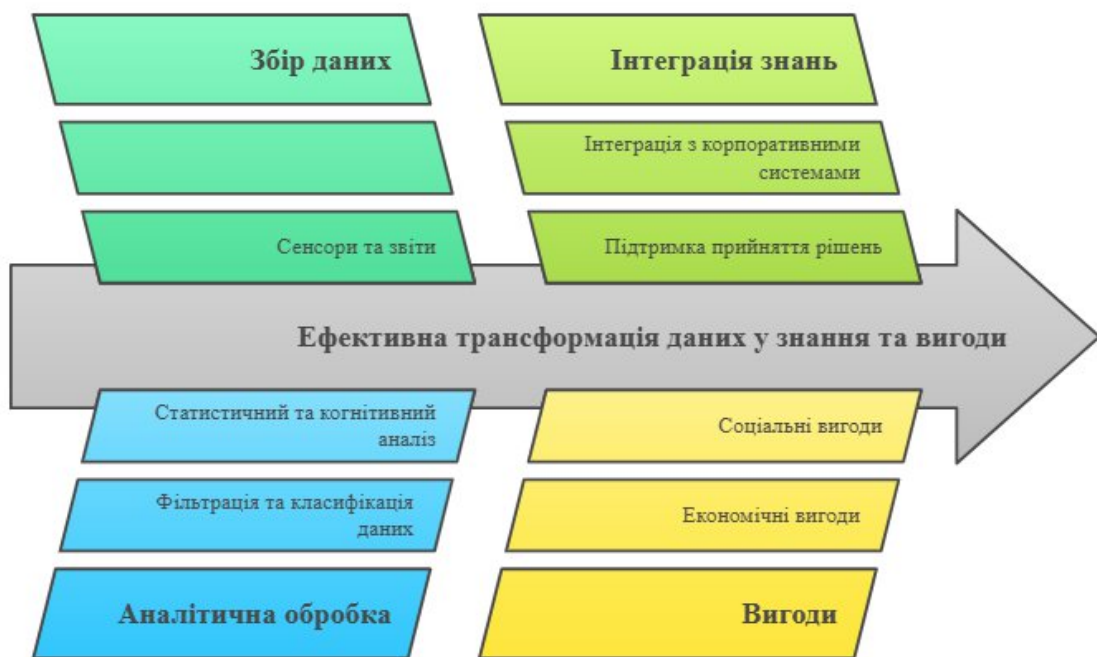


Рис. 1.9 Модель трансформації даних у знання та вигоди в когнітивному просторі будівельного проекту (розроблено автором на основі [49])

Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень (Decision Support Systems — DSS) розглядаються як ключовий елемент сучасного управління складними проектами. Вони забезпечують можливість швидкої обробки інформації, моделювання сценаріїв розвитку подій та вибору оптимальних рішень із урахуванням технічних, фінансових і часових обмежень.

На відміну від традиційних інформаційних систем, які виконують переважно облікові або реєстраційні функції, інтелектуальні DSS здатні самостійно навчатися на основі аналізу минулих даних і поточних тенденцій, виявляючи закономірності та зв'язки, непомітні для людини. У контексті будівельного проекту це означає, що система може прогнозувати відхилення, попереджати ризики, оптимізувати витрати матеріалів і робочої сили, а також підказувати найраціональніші управлінські рішення [128].

Використання інтелектуальних систем у поєднанні з BIM-технологіями формує когнітивне середовище управління, де інформаційні процеси взаємопов'язані, а прийняття

рішень базується на фактах, моделях і алгоритмах. Такі системи стають не лише інструментом автоматизації, а й інтелектуальним партнером менеджера проєкту, що забезпечує підтримку на всіх етапах життєвого циклу об'єкта — від концептуального проєктування до експлуатації [153].

Сутність когнітивного управління полягає у перетворенні даних у знання, а знань — у конкретні управлінські дії. Для цього інтелектуальні системи використовують технології семантичного аналізу, нейронних мереж, машинного навчання та прогнозного моделювання. У результаті формується адаптивна система, здатна:

- виявляти тенденції розвитку процесів у реальному часі;
- передбачати наслідки рішень ще до їх практичної реалізації;
- надавати рекомендації щодо підвищення ефективності ресурсного використання;
- забезпечувати прозорість взаємодії між усіма учасниками проєкту [275].

Особливо важливим є те, що така система дозволяє створювати динамічну базу знань, яка постійно оновлюється під впливом нових даних. Це надає підприємствам можливість не лише зберігати інформацію, а й розвивати власну організаційну пам'ять, формуючи корпоративний досвід у цифровій формі. На практиці це забезпечує більш обґрунтоване стратегічне планування, підвищує рівень узгодженості управлінських рішень і сприяє безперервному вдосконаленню процесів.

Варто зазначити, що розвиток інтелектуальних систем у будівельній галузі відбувається за трьома основними напрямками:

1. Автоматизація аналітики — створення систем, здатних самостійно аналізувати масиви даних і формувати висновки без участі людини.
2. Когнітивна інтеграція — побудова інформаційних середовищ, у яких BIM-модель виступає центральним вузлом збору, обробки та синтезу інформації.
3. Прогнозно-адаптивне управління — використання аналітичних моделей, що дозволяють передбачати зміну стану об'єкта, графіків чи ризиків і автоматично адаптувати управлінські рішення.

Такі підходи відкривають можливість переходу до самонавчальних систем управління проєктами, у яких рішення ухвалюються на основі алгоритмів, що постійно вдосконалюються внаслідок аналізу нових даних. У поєднанні з великими даними та когнітивними алгоритмами це створює фундамент для формування інтелектуальних цифрових екосистем, здатних забезпечувати стійкий розвиток будівельних організацій.

У підсумку, впровадження інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у поєднанні з BIM-технологіями формує нову інформаційно-когнітивну парадигму управління будівельними проєктами. Вона забезпечує синергію даних, аналітики та управління, дозволяючи перетворити інформаційні потоки на стратегічний ресурс підвищення ефективності, якості та інноваційної активності підприємства [59].

Сьогодні економіка знань функціонує в умовах постійного зростання інформаційних потоків, що трансформує способи створення, збереження й використання знань у різних галузях діяльності. Особливо це відчутно в управлінні будівельними проєктами, де обсяг даних зростає експоненційно, а потреба в оперативному аналізі та прогнозуванні вимагає нових методологічних підходів.

Історично управління знаннями базувалося на людському досвіді — накопиченні, документуванні та поширенні найкращих практик. Такий традиційний підхід

орієнтований на перетворення неявних знань (досвіду, навичок, інтуїції працівників) у явні знання — інструкції, звіти, методики, процедури. Його метою є збереження організаційної пам'яті та використання досвіду минулих рішень для покращення майбутніх процесів [139].

З появою технологій Big Data виник альтернативний, або аналітичний підхід до управління знаннями, заснований на відкритті нових закономірностей у великих обсягах структурованих і неструктурованих даних. На відміну від класичної моделі, де знання передаються від людини до людини, у підході, що базується на великих даних, знання формуються автоматично в результаті аналітичної обробки інформаційних потоків.

Головне завдання сучасного управління знаннями полягає не лише у фіксації накопиченого досвіду, а у передбаченні майбутніх подій, навігації в інформаційному середовищі та підтримці рішень на основі аналітичних висновків. Це робить управління знаннями більш динамічним, адаптивним і прогностичним. Для будівельних підприємств це означає здатність аналізувати величезні масиви ВІМ-даних, даних сенсорів, технічних звітів і контрактних документів для формування нових знань про стан об'єкта, ризику та ефективність управлінських дій [257].

Обидва підходи — традиційний і заснований на великих даних — не є взаємовиключними. Навпаки, їх поєднання формує когнітивну архітектуру управління знаннями, у якій людський досвід гармонійно інтегрується з машинним аналізом даних. Такий взаємозв'язок наочно відображено на рисунку 1.10, що демонструє порівняння логіки створення знань у двох підходах.

Як показано на рисунку 1.10, основна відмінність між підходами проявляється на етапах створення, взаємодії та зберігання знань. У традиційній моделі ключову роль відіграє особистий контакт, комунікація та передача досвіду між людьми. У підході, заснованому на великих даних, участь людини зведена до мінімуму — вона лише задає напрямки аналітичних процесів, тоді як самі знання формуються в результаті постійної обробки потоків інформації [241].

При цьому змінюється і місце збереження знань. Якщо раніше знання існували переважно в індивідуальній або колективній пам'яті працівників, то тепер вони акумулюються в цифрових базах, сховищах і аналітичних системах. Таке «оцифрування знань» дає змогу не лише швидко отримувати доступ до необхідної інформації, але й оновлювати її в режимі реального часу [370].

В управлінні будівельними проєктами це означає формування динамічної когнітивної системи, у якій дані перетворюються на знання безпосередньо в процесі їх обробки. Головною метою такої системи є інтеграція, аналіз і синтез інформації з різних джерел для формування нових знань, що забезпечують ефективне прийняття рішень і стратегічну стійкість організації.

Зрештою, сучасна парадигма управління знаннями еволюціонує у напрямі інтелектуалізації — поєднання людського мислення, досвіду та когнітивних алгоритмів. У цьому поєднанні народжується новий тип знань — аналітичні, прогностичні та адаптивні, які не лише відображають минулий досвід, а й формують бачення майбутнього розвитку організації.

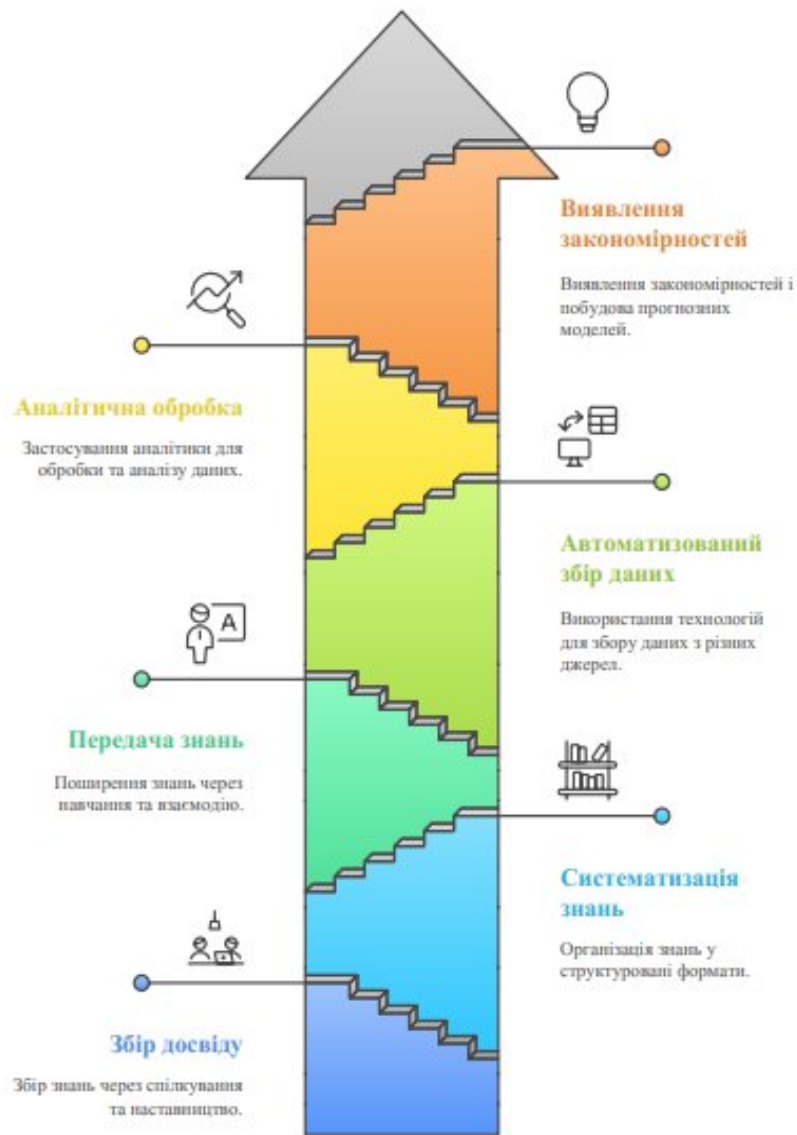


Рис. 1.10. Порівняння традиційного підходу до управління знаннями та підходу, заснованого на великих даних (розроблено автором на основі [370])

Попри загальне визнання стратегічної важливості великих даних у сучасній науці й практиці управління, єдиного визначення цього поняття досі не існує. Це пояснюється багатовимірністю самої концепції, яка охоплює як технологічні, так і організаційні, аналітичні та соціальні аспекти.

Різні дослідники трактують поняття Big Data у власний спосіб, акцентуючи увагу на тих характеристиках, які є ключовими для їх галузі. Так, Mayer-Schönberger і Cukier вважають, що витoki терміна «великі дані» сягають наукових дисциплін, у яких спостерігаються надзвичайно великі обсяги інформації — зокрема, астрономії та геноміки. Саме ці галузі першими відчували потребу в нових методах збору, обробки та інтерпретації масивів даних, які виходили за межі традиційних аналітичних можливостей.

Інші науковці підкреслюють, що великі дані — це не нове явище, а еволюційний етап розвитку інформаційних систем, у межах якого значний обсяг інформації розглядається як джерело нової цінності. Так, за твердженням низки авторів, потенціал

великих даних полягає у здатності створювати нові знання, формувати конкурентні переваги та підтримувати процеси прийняття рішень, хоча їх використання супроводжується складнощами управління, структуризації та безпеки інформації [171].

Кнарр визначає великі дані як сукупність інструментів, процесів і методів, що дозволяють організаціям створювати, зберігати, керувати й обробляти великі обсяги інформації, перетворюючи їх на знання. Подібною позиції дотримується Jordan, який підкреслює, що характерними рисами великих даних є складність, потреба у спеціалізованих базах даних, аналітичних програмах і висококваліфікованому персоналі для ефективного управління цими наборами [205].

На думку Ohlhorst, великі дані — це такі інформаційні масиви, які неможливо ефективно обробляти традиційними засобами, а зі зростанням їх обсягу стає дедалі складніше отримати з них практичну користь. Подібну думку висловлюють Provost і Fawcett, які характеризують великі дані як «набори інформації, що перевищують обчислювальні можливості класичних систем і потребують застосування нових технологій» [217].

Систематизацію основних наукових підходів до трактування поняття «великі дані» наведено на рисунку 1.11, де показано еволюцію уявлень — від технічного сприйняття Big Data як інструменту до розуміння її як соціально-когнітивного феномена сучасного суспільства.

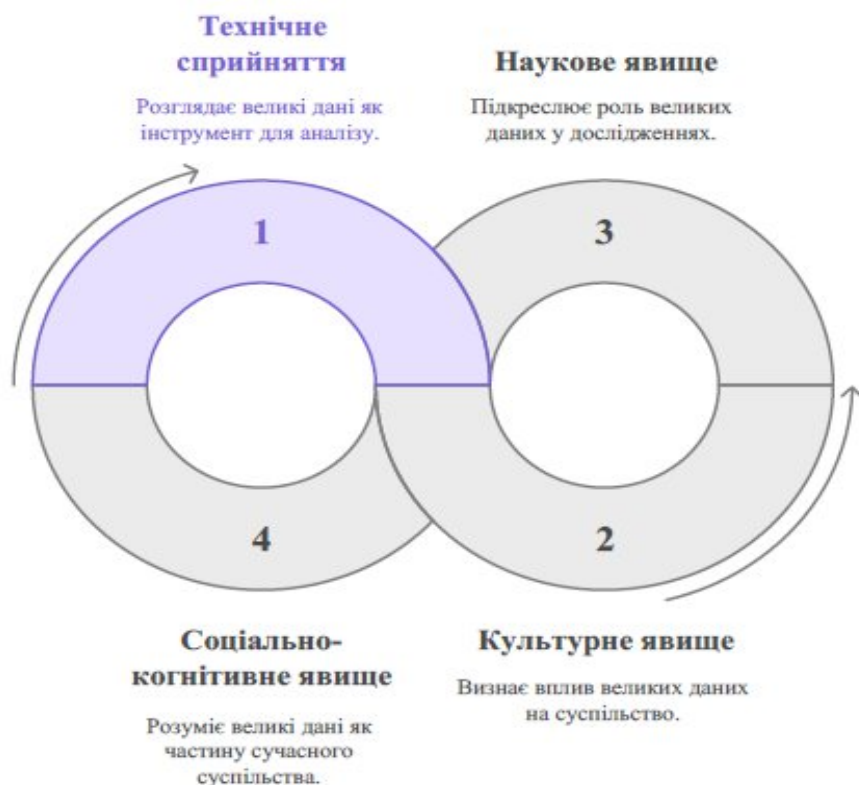


Рис. 1.11. Еволюція наукових підходів до розуміння сутності великих даних (розроблено автором на основі [217])

Процес управління великими даними є невід’ємною складовою сучасних систем управління проектами, оскільки саме від якості та глибини оброблення інформації

залежить точність управлінських рішень, ефективність використання ресурсів і здатність передбачати ризики. На відміну від традиційного підходу, який зосереджувався переважно на фіксації фактів, сучасна концепція управління великими даними передбачає перетворення інформаційних потоків у нові знання, що підтримують стратегічні та оперативні рішення.

Типовий процес управління великими даними складається з послідовної серії взаємопов'язаних етапів, які охоплюють повний цикл роботи з інформацією — від збору первинних даних до їх аналітичного осмислення та практичного застосування у прийнятті рішень. На початковому етапі здійснюється ідентифікація джерел даних, що включає внутрішні та зовнішні системи: бази даних організації, сенсорні мережі, інформаційні потоки з BIM-моделей, звіти постачальників, результати моніторингу будівельних процесів тощо. Зібрані відомості далі проходять етап інтеграції та агрегації, коли інформація з різних джерел об'єднується в єдине середовище, уніфікується за форматами та перетворюється у зручний для аналізу вигляд.

Після цього дані надходять до сховищ великої ємності, де вони зберігаються у централізованих структурах типу Data Warehouse або Data Lake. Таке середовище забезпечує контроль доступу, надійність, резервне копіювання та можливість подальшої автоматизованої обробки. Наступною складовою процесу є очищення та підготовка даних, що включає видалення помилкових, дубльованих або неповних записів, а також перевірку достовірності інформації. Висока якість даних є критичною передумовою для отримання достовірних аналітичних результатів.

Підготовлені дані переходять на рівень аналітичного опрацювання, де застосовуються методи статистичного аналізу, машинного навчання, штучного інтелекту та когнітивного моделювання. На цьому етапі формуються закономірності, тренди та прогнози, які мають прикладне значення для конкретного проєкту — наприклад, прогнозування термінів виконання робіт, виявлення відхилень у витратах чи аналіз ризиків експлуатації. Завершальним етапом є візуалізація результатів і підтримка прийняття рішень. Аналітична інформація подається у вигляді інтерактивних панелей, графіків, когнітивних карт або тривимірних моделей, інтегрованих у BIM-середовище. Це забезпечує зручне сприйняття складних залежностей і дає змогу приймати рішення, ґрунтуючись на фактах та прогнозах, а не на інтуїції.

На рисунку 1.12 представлено узагальнену блок-схему процесу управління великими даними у проєктному середовищі, що демонструє логіку руху інформаційних потоків від джерел до рівня прийняття рішень. Вона відображає послідовну трансформацію даних — від їх генерації, збору й інтеграції до очищення, аналітики, візуалізації та когнітивного осмислення результатів.

Як ми можемо побачити, система управління великими даними функціонує як замкнений цикл постійного вдосконалення: результати аналітики повертаються у вигляді нових даних, що дозволяє системі навчатися та самостійно підвищувати точність прогнозів. Такий підхід є основою когнітивного управління, у межах якого великі дані перетворюються на динамічний інформаційний ресурс, що забезпечує адаптивність, стійкість і передбачуваність процесів управління проєктами.

Нині у будівництві подібна модель реалізується через інтеграцію технологій Big Data і BIM, які разом утворюють інтелектуальне середовище — Smart Project Space. Воно дозволяє об'єднати аналітику, прогнозування й візуалізацію в єдину платформу

управління життєвим циклом об'єкта, що сприяє зниженню ризиків, підвищенню якості рішень і формуванню нових форм цифрової компетентності управлінців [188].

Серед ключових напрямів розвитку інтелектуальних систем у будівництві є машинне навчання (Machine Learning), яке забезпечує перехід від традиційного аналітичного підходу до когнітивного аналізу даних у BIM-середовищі. У межах цифрового простору будівельного проєкту машинне навчання виступає інтелектуальним механізмом, що дозволяє виявляти закономірності, прогнозувати події та приймати рішення без прямого втручання людини.

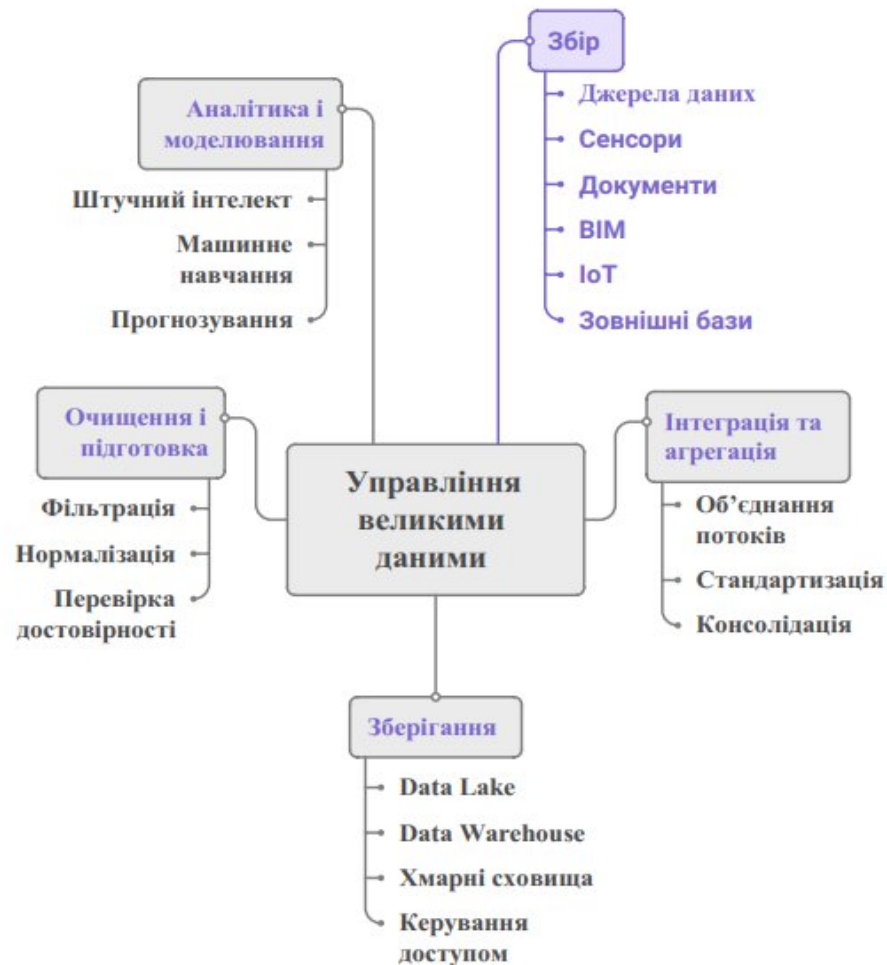


Рис. 1.12. Типовий процес управління великими даними у системі реалізації проєкту (розроблено автором на основі [188])

Сутність машинного навчання полягає в тому, що комп'ютерні системи здатні самостійно розпізнавати зв'язки між змінними на основі історичних даних і формувати моделі, які узагальнюють досвід проєктної діяльності. Це не просто процес програмування — це процес навчання системи мислити в термінах даних, знаходити нові знання там, де аналітик бачить лише хаотичні набори інформації.

У контексті BIM (Building Information Modeling) технологій машинне навчання є ядром когнітивного управління, адже воно перетворює великі масиви технічних, часових і експлуатаційних даних на аналітичні моделі, що здатні пояснювати поведінку системи,

передбачати ризики й оптимізувати управлінські дії. Хоча машинне навчання найбільш активно застосовується на етапі моделювання даних у процесі Big Data-аналітики, його методи можна інтегрувати практично на всіх етапах життєвого циклу об'єкта — від збору й очищення інформації до прогнозування експлуатаційної стійкості чи визначення оптимальних графіків будівництва [12].

На етапі підготовки даних алгоритми машинного навчання дозволяють автоматично очищувати інформацію, усувати аномалії, групувати схожі параметри й заповнювати пропущені значення. У дослідницькій фазі вони допомагають знаходити приховані зв'язки між змінними, які неможливо виявити звичайною візуальною аналітикою. Під час моделювання створюються когнітивні структури, що навчаються на історичних даних та формують прогностичні сценарії розвитку системи.

Процес машинного навчання у BIM-контексті зазвичай охоплює чотири ключові етапи, які утворюють циклічний контур самонавчання системи:

1. Побудова концептуальної моделі — визначення цільових показників (наприклад, терміни, вартість, ризики, рівень дефектності) і вибір відповідного типу моделі (регресійна, класифікаційна, нейромережева).
2. Навчання моделі — використання навчальної вибірки даних для налаштування параметрів алгоритму.
3. Оцінювання ефективності — перевірка точності прогнозів за допомогою тестової вибірки.
4. Адаптація й застосування — використання моделі для аналізу нових даних та її поступове донавчання при надходженні нової інформації [35].

Ці етапи утворюють замкнутий когнітивний цикл, у якому система безперервно вдосконалює свої прогнози, коригуючи їх відповідно до змін середовища. У BIM-проєктах такий підхід дозволяє автоматично прогнозувати затримки, виявляти ризики дефектів конструкцій, оцінювати споживання ресурсів і навіть пропонувати оптимальні сценарії монтажу.

Для узагальнення сфер застосування машинного навчання в BIM-просторі, методів і типів даних, з якими вони працюють, у таблиці 1.10 наведено систематизацію основних напрямів використання ML у когнітивних моделях будівельних проєктів.

Як видно з таблиці, машинне навчання у BIM-середовищі виступає механізмом самонавчання когнітивного простору, який забезпечує аналітичну інтеграцію даних, їх узагальнення та прогнозування поведінки системи в часі. Застосування цих технологій змінює парадигму управління будівельними проєктами — від реактивного контролю до превентивного й аналітичного управління, де рішення ґрунтуються не на минулих звітах, а на передбаченні майбутніх подій.

У перспективі поєднання машинного навчання, великих даних і BIM-технологій формує інтелектуальне ядро цифрового підприємства, яке здатне самостійно аналізувати ситуацію, коригувати дії та оптимізувати ресурси, створюючи справжній когнітивний простір управління будівництвом.

У межах когнітивного BIM-простору машинне навчання виконує роль ключового інтелектуального інструменту, що забезпечує здатність системи самостійно аналізувати інформацію, виявляти закономірності та прогнозувати події без прямого програмування. Залежно від ступеня участі людини у процесі побудови моделей, усі методи машинного

навчання поділяються на три основні типи: з учителем, без учителя та з частковим контролем [292].

Таблиця 1.10.

Застосування машинного навчання в BIM-середовищі будівельного проекту
(розроблено автором на основі [292])

№	Напрямок застосування	Типи даних	Методи машинного навчання	Очікувані результати
1	Прогнозування термінів і вартості	Тимчасові ряди, календарні плани, кошториси	Лінійна/множинна регресія, дерева рішень, ансамблеві моделі	Прогноз тривалості робіт, оцінка відхилень бюджету, формування реалістичних графіків
2	Виявлення ризиків і дефектів конструкцій	Дані сенсорів, фотограмметрія, звіти про контроль якості	Нейронні мережі, метод опорних векторів (SVM), кластеризація	Виявлення структурних аномалій, попередження аварій, моніторинг стану об'єкта
3	Оптимізація використання ресурсів	Дані про обладнання, трудові ресурси, логістика	Стохастичне моделювання, методи підкріплення	Зниження простоїв, покращення ефективності розподілу техніки та персоналу
4	Аналіз експлуатаційної поведінки	Енергоспоживання, навантаження, дані систем моніторингу	Нейромережеве прогнозування, рекурентні моделі (LSTM)	Прогнозування стану інженерних систем, оптимізація енергоефективності
5	Когнітивна підтримка прийняття рішень	Інтегровані дані з BIM, IoT, ERP	Байєсівські мережі, ансамблі моделей, гібридні системи	Формування рекомендацій, підтримка стратегічних і тактичних рішень

Машинне навчання з учителем (Supervised Learning) є найбільш поширеним підходом, що передбачає використання попередньо позначених даних, тобто таких, у яких кожному прикладу відповідає відомий результат. У контексті BIM це може бути пара «елемент конструкції – стан» або «параметри моделі – фактична вартість». Система навчається на історичних даних, щоб у майбутньому прогнозувати значення для нових об'єктів, що не зустрічалися раніше.

Контрольоване навчання охоплює два основних напрями — класифікацію та регресію. Класифікація дає змогу віднести об'єкт до певної категорії (наприклад, визначити тип дефекту чи рівень ризику), тоді як регресія використовується для передбачення числових параметрів, таких як тривалість будівельних робіт, витрати ресурсів чи рівень енергоспоживання. Таким чином, алгоритми з учителем допомагають перетворювати накопичені BIM-дані на конкретні прогнози, що сприяють прийняттю рішень у процесі управління проектом.

Машинне навчання без учителя (Unsupervised Learning), на відміну від попереднього підходу, застосовується тоді, коли відсутні заздалегідь визначені результати. Система має лише «вхідні» дані й самостійно шукає в них закономірності, структури або групи схожих об'єктів. У BIM-середовищі це дає змогу виявляти аномалії в

конструкціях, групувати елементи за властивостями матеріалів чи формами, а також виконувати кластеризацію об'єктів на основі технічних параметрів. Такий підхід є надзвичайно ефективним у виявленні прихованих взаємозв'язків, які часто залишаються непомітними під час звичайного аналізу.

Третім типом є машинне навчання з частковим контролем (Semi-supervised Learning), яке поєднує елементи двох попередніх методів. Частина даних у цьому випадку є позначеною, інша — ні. Це дає змогу алгоритмам навчатися навіть за умов обмеженої кількості даних із мітками, що є типовою ситуацією для будівельної галузі, де не всі параметри об'єктів мають точні вимірювання або верифікацію. У BIM-системах цей підхід використовується для прогнозування технічного стану конструкцій, моніторингу експлуатаційних характеристик або оцінки ризиків у разі відсутності повної інформації.

Загалом усі три підходи до машинного навчання формують когнітивну основу BIM-аналітики, створюючи можливість для автоматизованого прийняття рішень, адаптивного планування та підвищення ефективності управління. На рисунку 1.13 представлено узагальнену схему взаємозв'язку між цими трьома типами навчання, їхніми джерелами даних та очікуваними результатами в межах когнітивного простору будівельного проекту.

Як показано на рисунку, усі три типи машинного навчання взаємодіють між собою у межах єдиного когнітивного середовища BIM, створюючи самонавчальну систему, здатну вдосконалювати власні прогнози з кожним новим циклом даних. Алгоритми з учителем формують основу для передбачення конкретних результатів, неконтрольовані методи відкривають нові закономірності у великих інформаційних масивах, а підходи з частковим контролем забезпечують гнучкість і стійкість системи до неповноти даних.

Завдяки інтеграції цих методів BIM-середовище набуває властивостей когнітивного інтелекту, здатного самостійно навчатися, адаптуватися до змін і формувати рішення на основі аналізу досвіду. Це перетворює традиційне управління будівництвом у динамічну систему інтелектуальної підтримки, де машинне навчання стає центральним компонентом цифрової трансформації галузі.

Подальший розвиток BIM-технологій і машинного навчання закономірно веде до формування нової концепції — когнітивного середовища управління будівництвом, у якому дані перетворюються на активний ресурс, а система — на самонавчальний організм. У цьому середовищі машинне навчання не є окремим інструментом аналізу, воно стає архітектурною основою функціонування BIM, що забезпечує безперервний обмін знаннями між моделлю, користувачем і реальним об'єктом.

Когнітивні BIM-платформи нового покоління здатні автоматично накопичувати досвід із попередніх проектів, узагальнювати його та застосовувати для покращення майбутніх рішень. Це створює передумови для еволюції систем управління — від реактивного аналізу минулих даних до передбачення можливих сценаріїв і динамічного коригування стратегії виконання проекту. Такий підхід змінює саму природу управлінської діяльності: замість реагування на зміни, система передбачає їх і пропонує найдоцільніші дії.

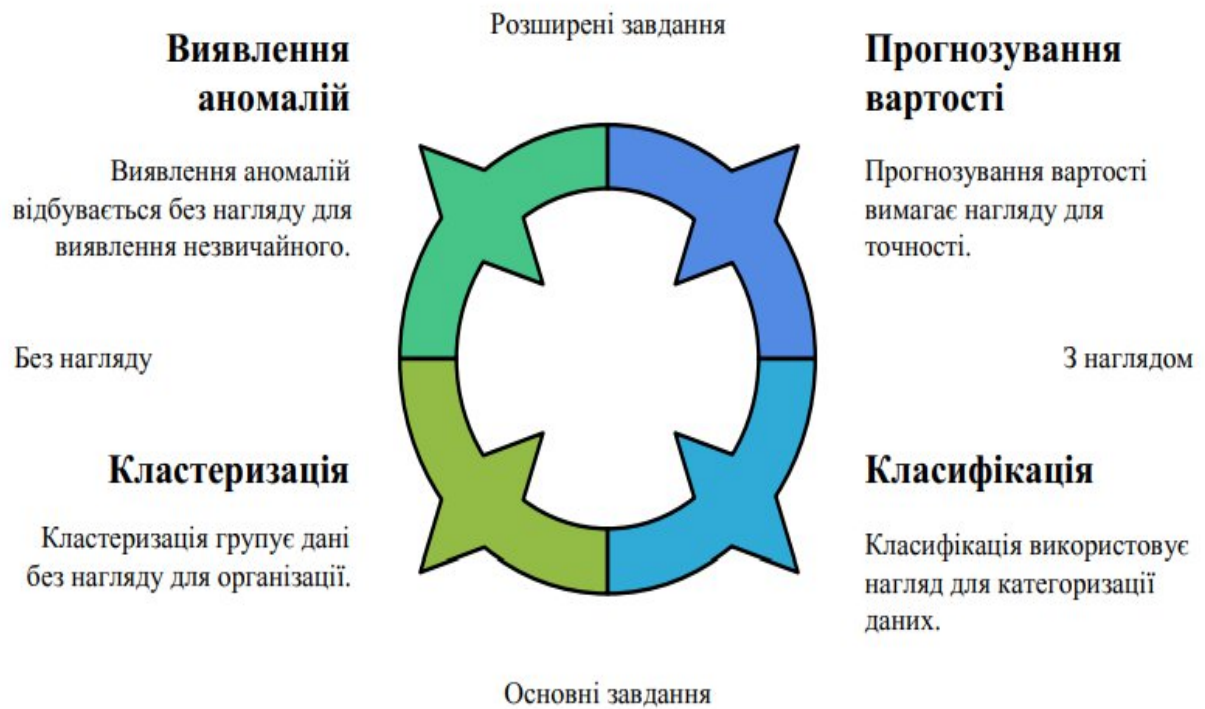


Рис. 1.13. Класифікація підходів машинного навчання в когнітивному BIM-просторі (розроблено автором на основі [74])

У практичному вимірі машинне навчання формує “цифрову інтуїцію” BIM-середовища — здатність розуміти контекст, розпізнавати причинно-наслідкові зв’язки та формувати рекомендації в реальному часі. Наприклад, система може аналізувати дані з десятків сенсорів, враховувати метеоумови, навантаження на конструкції, динаміку витрат і на основі цих факторів прогнозувати потенційні ризики або оптимізувати використання ресурсів. Це дозволяє керівнику будівництва діяти не інтуїтивно, а спираючись на обґрунтовану, багатовимірну аналітику.

Особливої уваги заслуговує самонавчальний аспект таких систем. Кожен новий цикл будівельних робіт або експлуатаційних вимірів стає додатковим джерелом знань, яке поповнює цифрову базу досвіду. З часом модель не лише уточнює свої прогнози, а й удосконалює власні алгоритми поведінки, наближаючись до автономного прийняття рішень. Це означає, що BIM-система поступово перетворюється на когнітивного партнера, який не просто обробляє дані, а мислить у термінах ефективності, безпеки та сталого розвитку.

Важливо, що такий підхід сприяє глибшій інтеграції між усіма учасниками будівельного процесу. Завдяки єдиному аналітичному простору проєктувальники, інженери, економісти та управлінці працюють у синхронізованому інформаційному середовищі. Машинне навчання забезпечує зворотний зв’язок між етапами життєвого циклу: результати експлуатації об’єкта повертаються в систему і використовуються для вдосконалення проєктних рішень у майбутньому. Це створює замкнений цикл знань, який постійно самовдосконалюється.

Ще однією перспективною тенденцією є поєднання когнітивного аналізу з візуальною аналітикою у межах інтегрованих панелей управління. Візуалізація результатів машинного навчання в BIM дозволяє не лише бачити аналітичні залежності, а й інтерпретувати їх у контексті тривимірної моделі об'єкта. Таким чином, користувач отримує не абстрактні числові показники, а візуально зрозумілі сигнали — наприклад, виділення ризикових елементів у моделі або динамічне кольорове маркування зон з підвищеним навантаженням. Це значно спрощує процес прийняття рішень і робить його більш інтуїтивним.

Загалом машинне навчання у BIM-середовищі формує основу цифрової еволюції галузі, забезпечуючи перехід від інформаційного до когнітивного управління. Завдяки цьому цифрові моделі набувають властивостей інтелекту — здатності адаптуватися, навчатися, робити висновки й діяти цілеспрямовано. Такий підхід не лише підвищує ефективність управління проєктами, а й змінює саму парадигму будівництва, перетворюючи його на самонавчальну, передбачувану й стійку систему, орієнтовану на якість, безпеку та сталий розвиток.

1.5. Постановка проблеми та визначення наукових завдань дослідження

Зростання складності організаційно-технологічних систем у будівельній галузі, підвищення вимог до ефективності управління, узгодженості рішень і взаємодії учасників проєкту зумовлюють необхідність перегляду традиційних підходів до організації управлінських процесів. Наявні моделі, що базуються переважно на формалізованих ієрархічних структурах, не здатні забезпечити належний рівень адаптивності та інтеграції інформаційних, комунікаційних і знанневих потоків у межах складного проєктного середовища. Водночас у процесі реалізації будівельних проєктів особливого значення набувають неформальні взаємозв'язки, соціальні взаємодії та когнітивні аспекти прийняття рішень, які залишаються недостатньо врахованими в існуючих підходах до управління.

Проблема полягає у відсутності системного науково-методичного апарату, який би забезпечував цілісне відображення та інтеграцію технологічних, інформаційних, соціальних і когнітивних компонентів у єдину модель управління будівельним проєктом. Існує потреба у формуванні когнітивного простору, що відображає динаміку взаємодії між учасниками проєкту, дозволяє ідентифікувати ключові інформаційні зв'язки, аналізувати механізми обміну знаннями та формувати основу для інтелектуальної підтримки управлінських рішень. Такий підхід має забезпечити не лише синхронізацію дій між суб'єктами проєкту, а й підвищення рівня прозорості, адаптивності та обґрунтованості управлінських процесів.

Метою дослідження є наукове обґрунтування концепції когнітивного простору будівельного проєкту та розроблення теоретико-методичних положень, спрямованих на підвищення ефективності управління за рахунок інтеграції інформаційних, соціальних і когнітивних складових у єдину систему. Для реалізації цієї мети передбачено вирішення комплексу наукових завдань, серед яких — аналіз існуючих методологічних підходів до формування інформаційно-когнітивних систем управління; визначення структури, функціональних компонентів та взаємозв'язків елементів когнітивного простору; побудова моделі інтеграції інформаційних, соціальних, формальних і неформальних

мереж у межах єдиного когнітивного середовища; розроблення методики оцінювання рівня когнітивної узгодженості між учасниками проєкту; обґрунтування ролі та принципів застосування BIM-технологій як інформаційної основи когнітивного управління; а також створення концептуальних засад системи інтелектуальної підтримки управлінських рішень у будівельних проєктах [24].

З огляду на зростання масштабності та взаємозалежності процесів у будівельній галузі, управління проєктами дедалі більше потребує переосмислення системи взаємодії між її учасниками, джерелами інформації та середовищами прийняття рішень. Традиційні підходи, що спираються на формальні ієрархії, стандартизовані документообіги та лінійні схеми комунікації, виявляють обмежену здатність відображати складну динаміку когнітивних, соціальних і інформаційних процесів, характерних для сучасного будівельного проєкту. У таких умовах основною науково-прикладною проблемою постає відсутність інтегрованої моделі, яка б забезпечувала узгоджене функціонування інформаційних, соціальних, управлінських та знанневих мереж у єдиному когнітивному просторі.

Актуальність даного дослідження зумовлена потребою у розробленні системи, здатної забезпечити прозорість, гнучкість і передбачуваність управлінських рішень через інтеграцію даних, знань і когнітивних взаємозв'язків. Це вимагає формування наукових засад моделювання когнітивного простору будівельного проєкту як відкритої інформаційно-семантичної системи, у межах якої здійснюється взаємодія між технічними, інформаційними, соціальними та управлінськими компонентами [39].

Зазначені взаємозв'язки доцільно представити у вигляді концептуальної схеми, що демонструє багаторівневу структуру когнітивного простору будівельного проєкту, зображену на рисунку 1.14. У ній відображено взаємодію між рівнями управління, типами мереж та інформаційними потоками, які формують єдине когнітивне середовище.

Рисунок демонструє ієрархічно-мережеву структуру когнітивного простору, у якій інформаційні, соціальні та знанневі компоненти поєднані у динамічну систему взаємодії. Центральне місце займає управлінський рівень, що забезпечує формування цілей і прийняття рішень на основі знань, які генеруються в результаті комунікацій і аналізу інформаційних потоків. Взаємодія між рівнями забезпечує безперервний когнітивний цикл — від збору даних до створення нових знань і зворотного впливу на управлінські рішення [193].

Проблема дослідження полягає у відсутності теоретично обґрунтованого підходу до побудови когнітивної архітектури управління будівельним проєктом, що враховує багаторівневий характер взаємодії учасників, поєднання формальних і неформальних зв'язків, а також роль знанневих процесів у формуванні управлінських стратегій. Зазначене обумовлює необхідність створення інструментарію, який дозволяє не лише ідентифікувати структуру когнітивного простору, але й оцінювати рівень його узгодженості, визначати ключові вузли комунікацій і прогнозувати інформаційні потоки.

Метою дослідження є розроблення концептуальної моделі когнітивного простору будівельного проєкту, яка інтегрує інформаційні, соціальні, управлінські та знанневі компоненти в єдину систему, що забезпечує підвищення ефективності управління за рахунок інтелектуалізації процесів прийняття рішень.



Рис. 1.14. Структурна модель когнітивного простору будівельного проєкту
(розроблено автором на основі [39])

Для досягнення цієї мети передбачено реалізацію таких взаємопов'язаних завдань: проведення критичного аналізу існуючих підходів до управління знаннями й інформаційними потоками в будівництві; визначення структури когнітивного простору проєкту та його ключових елементів; формування моделі інтеграції соціальних, інформаційних, формальних і неформальних мереж; розроблення методики оцінювання когнітивної узгодженості та ефективності інформаційної взаємодії; обґрунтування ролі BIM-технологій як інформаційної основи когнітивного управління; а також створення концепції інтелектуальної панелі підтримки управлінських рішень.

Структурно постановку проблеми можна представити через інтегровану модель взаємодії між ключовими складовими когнітивного середовища будівельного проєкту (рис. 1.15). У центрі цієї моделі розташований когнітивний простір, який поєднує чотири взаємопов'язані підсистеми: інформаційну, соціальну, управлінську та знанняву. Інформаційна підсистема забезпечує обмін даними та формування інформаційних потоків; соціальна — відображає мережу взаємодій між учасниками; управлінська — координує процеси прийняття рішень; знаннява — акумулює та трансформує досвід у нові знання. Взаємозв'язки між цими підсистемами формують основу когнітивної синергії, що визначає ефективність управління будівельним проєктом [169].

Сформульована постановка проблеми визначає необхідність створення науково обґрунтованої методології побудови когнітивного простору будівельного проекту, що поєднує інформаційні, соціальні та знаннєві процеси у єдину інтегровану систему управління, забезпечуючи узгодженість рішень і підвищення інтелектуального потенціалу проектного середовища.

Комунікація виступає базовим елементом когнітивного простору будівельного проекту, формуючи основу для створення, передавання та акумулювання знань. Вона забезпечує циркуляцію інформації між усіма учасниками, об'єднуючи їх у єдину систему взаємодії, у межах якої інформаційні потоки трансформуються у знання, а знання — у рішення, що впливають на результативність реалізації проекту. Наявність ефективно функціонуючої комунікаційної мережі дозволяє не лише мінімізувати інформаційні розриви, але й підвищити когнітивну узгодженість усіх учасників, забезпечуючи системну синхронізацію дій та спільне бачення цілей проекту.



Рис. 1.15. Концептуальна схема когнітивного простору будівельного проекту
(розроблено автором на основі [169])

Однак комунікація сама по собі не гарантує ефективного управління знаннями. Ключовим чинником є впровадження дієвих інструментів управління знаннями, які забезпечують формалізацію, збереження, обробку та подальше використання знань у процесі управління. Такі інструменти охоплюють методи, технології та інформаційні системи, що підтримують підпроцеси ідентифікації, накопичення, розповсюдження та застосування знань у межах життєвого циклу будівельного проекту.

Одним із найбільш потужних технологічних засобів, що реалізує ці функції, є технологія інформаційного моделювання в будівництві (BIM). Вона слугує ядром цифрової інтеграції проекту, об'єднуючи просторові, технічні, часові, економічні та організаційні аспекти в єдиному інформаційному середовищі. BIM-технології дозволяють здійснювати не лише візуалізацію та координацію проектних рішень, але й формувати базу знань, у якій акумулюється корпоративний досвід, стандарти та аналітичні моделі.

Крім того, у межах когнітивного простору BIM виступає інструментом інтелектуального аналізу даних (Big Data). Накопичені масиви даних, що утворюються на різних етапах реалізації проекту — від проектування до експлуатації, — стають стратегічним активом організації. Їх обробка за допомогою алгоритмів машинного навчання та аналітичних моделей сприяє формуванню нових знань, підвищенню точності прогнозів, виявленню закономірностей і оптимізації управлінських рішень.

Знання, отримані в процесі реалізації реальних проектів, мають особливу цінність, оскільки вони підтверджені практикою і містять глибинні закономірності функціонування системи. Такі знання формують когнітивний контур зворотного зв'язку, який забезпечує постійне вдосконалення управлінських рішень, моделей і стратегій у межах інформаційно-організаційного середовища будівельного проекту [193].

Структурно взаємозв'язок між елементами системи комунікації та інструментами управління знаннями у когнітивному середовищі будівельного проекту наведено у таблиці 1.11.

Таблиця 1.11.

Взаємозв'язок між комунікаційними механізмами та інструментами управління знаннями у когнітивному просторі будівельного проекту
(розроблено автором на основі [193])

Компонент когнітивного простору	Функціональна роль у системі комунікацій	Використовувані інструменти управління знаннями	Очікувані результати інтеграції
Інформаційна підсистема	Передача даних, координація потоків інформації між учасниками	BIM-платформи, цифрові бази даних, системи управління документами (CDE)	Централізоване зберігання даних, зменшення втрат інформації, підвищення прозорості процесів
Соціальна підсистема	Формування мереж взаємодії, неформальні зв'язки, обмін досвідом	Корпоративні комунікаційні платформи, експертні спільноти, соціальні мережі проекту	Посилення когнітивної взаємодії, обмін tacit knowledge, підвищення довіри між учасниками
Управлінська підсистема	Координація дій, прийняття стратегічних і оперативних рішень	Інтелектуальні панелі управління (Smart Dashboard), системи підтримки рішень (DSS), KPI-моніторинг	Підвищення точності управлінських рішень, оперативність реагування, адаптивність стратегії
Знаннєва підсистема	Накопичення, структуризація та трансформація знань у нові рішення	Big Data-аналітика, машинне навчання, онтологічні бази знань, когнітивне моделювання	Формування бази знань проекту, підвищення прогностичності, інтелектуалізація процесів управління

Ефективна система комунікацій, інтегрована з інструментами управління знаннями, створює основу для формування когнітивного управлінського середовища будівельного проекту. Вона забезпечує безперервний цикл обміну інформацією та знаннями, сприяє накопиченню корпоративного досвіду, а також формує передумови для впровадження інтелектуальних технологій управління. Саме в такому середовищі BIM-

технології, системи аналітики даних та комунікаційні мережі функціонують як взаємодоповнюючі компоненти єдиної когнітивної архітектури проєкту [78].

Варто також зазначити щодо когнітивного аспекту управління, що є одним із ключових напрямів розвитку сучасної теорії проєктного менеджменту, який забезпечує перехід від лінійних процесів обробки даних до системного осмислення інформації як ресурсу управлінських рішень. У межах будівельного проєкту когнітивний підхід передбачає створення когнітивного простору — інтегрованого інформаційно-семантичного середовища, у якому відбувається формування, накопичення, передавання та трансформація знань між усіма учасниками проєкту.

Такий когнітивний простір є не лише сховищем інформації, але й динамічною системою, що підтримує процеси сприйняття, інтерпретації та прогнозування. Він виступає середовищем спільного мислення проєктної команди, де взаємодіють технічні, соціальні та управлінські домени, а прийняття рішень ґрунтується не на інтуїції, а на аналізі структурованих знань.

У контексті будівельного проєкту когнітивний простір можна визначити як “інформаційно-семантичну багаторівневу систему, у межах якої здійснюється збір, осмислення, перетворення та застосування знань для прийняття обґрунтованих управлінських рішень, що відображають взаємодію між учасниками, технологіями та середовищем реалізації проєкту” [200].

У межах когнітивного простору формуються різні типи когнітивних зв’язків, які забезпечують обмін знаннями, інтерпретацію інформації та формування колективного бачення цілей проєкту. Залежно від природи інформаційної взаємодії, ці зв’язки доцільно поділити на три основні групи (табл. 1.12).

У результаті взаємодії цих трьох типів зв’язків формується когнітивна синергія — стан, коли інформаційні потоки, соціальні відносини та знанняві процеси утворюють самопідсилювальне середовище прийняття рішень. Саме ця синергія є основою для побудови інтегрованої моделі управління знаннями у будівельному проєкті.

Незважаючи на потенціал когнітивного управління, його ефективність обмежується наявністю когнітивних бар’єрів, які спотворюють сприйняття інформації, знижують якість рішень і уповільнюють процеси узгодження дій. Найпоширенішими серед них є:

- інформаційний шум — надлишковість або нерелевантність даних, що ускладнює пошук важливих сигналів;
- асиметрія інформації — нерівний розподіл знань між учасниками, що призводить до викривленого прийняття рішень;
- семантична неоднозначність — різне тлумачення одних і тих самих понять або параметрів;
- когнітивна інерція — схильність сприймати нову інформацію крізь призму усталених шаблонів і попереднього досвіду.

Так, поглиблення когнітивного аспекту управління дозволяє перейти від традиційних підходів до адаптивно-когнітивної системи, у якій рішення формуються на основі узгоджених знань, аналітичних моделей і спільного семантичного поля. Це створює підґрунтя для реалізації когнітивно-інформаційного управління, здатного забезпечити високий рівень гнучкості, передбачуваності та інтелектуалізації процесів у будівельному проєкті.

Таблиця 1.12.

Типи когнітивних зв'язків у будівельному проєкті
(розроблено автором на основі [79])

Тип когнітивного зв'язку	Характер взаємодії	Основне призначення	Приклади реалізації в управлінні проєктом
Інформаційно-логічні	Обмін структурованими даними та фактами між учасниками	Формування раціональної основи для прийняття рішень, перевірка достовірності даних	Передача BIM-моделей, аналітичних звітів, технічних специфікацій
Поведінково-інтерпретаційні	Обмін смислами, намірами, очікуваннями, що визначають поведінку учасників	Забезпечення узгодженості дій, формування довіри та спільного розуміння цілей	Неформальні комунікації, обговорення ризиків, колегіальні рішення
Контекстно-знансві	Систематизація досвіду, виявлення закономірностей, інтеграція знань з різних джерел	Формування бази знань і моделей прийняття рішень	Застосування DSS-систем, машинного навчання, онтологічних баз знань

Для нейтралізації цих бар'єрів у когнітивному просторі будівельного проєкту доцільно застосовувати інструменти цифрової підтримки управління, зокрема BIM-платформи, системи DSS (Decision Support Systems) та аналітику Big Data. Їхня дія узагальнено представлена на рисунку 1.16.

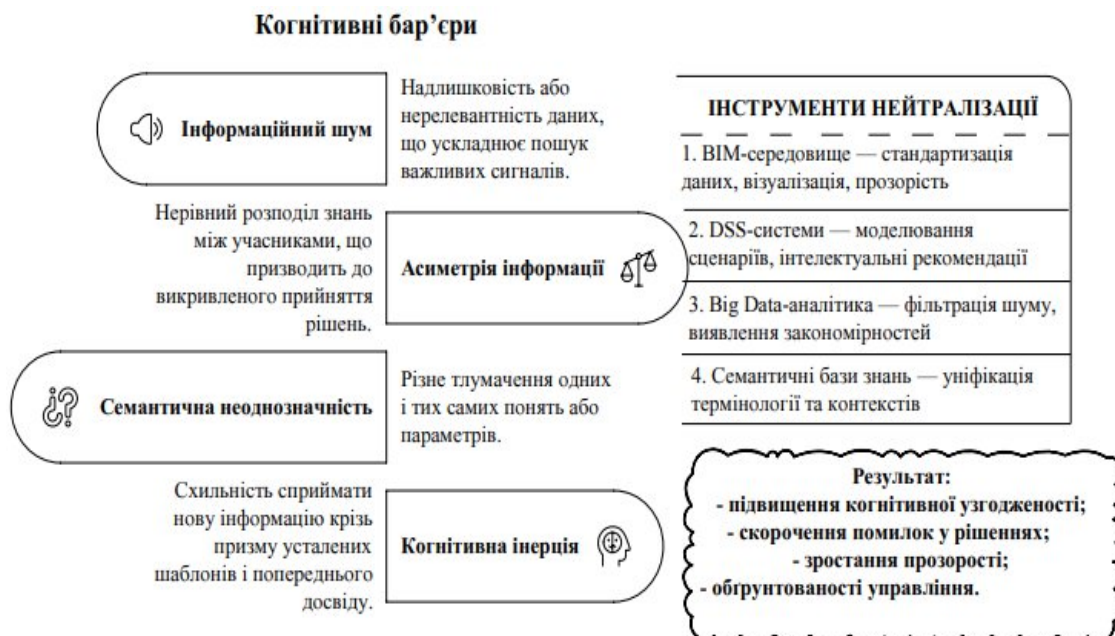


Рис. 1.16. Механізми нейтралізації когнітивних бар'єрів у когнітивному просторі будівельного проєкту (розроблено автором на основі [19])

Когнітивна узгодженість є ключовою передумовою ефективного управління будівельним проектом, адже саме вона визначає ступінь спільного розуміння, довіри та узгодженості дій між усіма учасниками. У контексті когнітивного простору узгодженість відображає синхронізацію інформаційних, поведінкових і знанневих процесів, які забезпечують перетворення індивідуальних уявлень проєктних учасників на колективну управлінську свідомість [199].

Іншими словами, когнітивна узгодженість — це не просто збіг позицій чи рішень, а спільне бачення причинно-наслідкових зв'язків у межах проєкту, яке дозволяє команді діяти скоординовано, навіть в умовах невизначеності. Високий рівень узгодженості означає, що всі суб'єкти управління однаково інтерпретують дані, поділяють цілі, адекватно сприймають ризики та розуміють логіку прийнятих рішень.

Когнітивну узгодженість доцільно розглядати як багаторівневу систему, що складається з трьох взаємопов'язаних складових (рис. 1.17):

1. Інформаційна узгодженість — забезпечує відповідність і цілісність інформаційних потоків між усіма учасниками. Вона досягається через стандартизацію даних, використання єдиних форматів (наприклад, IFC у BIM) та синхронізацію джерел даних.
2. Семантична узгодженість — передбачає єдине розуміння понять, термінів і контекстів, що використовуються в процесі управління. Вона формується через створення онтологічних баз знань і семантичних моделей.

Когнітивно-поведінкова узгодженість — визначає ступінь єдності у сприйнятті ситуацій, прогнозуванні наслідків і готовності діяти відповідно до спільної логіки. Вона формується через колективне навчання, симуляційні моделі, DSS-системи та інтелектуальні панелі підтримки рішень.

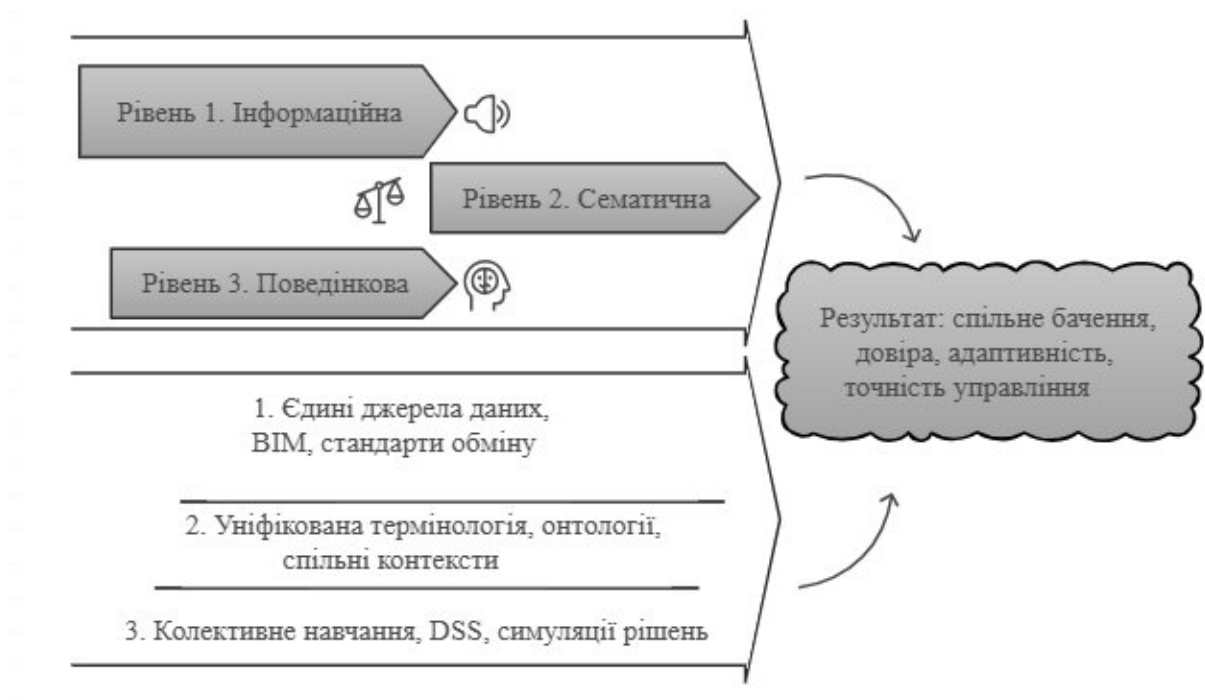


Рис. 1.17. Структурні рівні когнітивної узгодженості в системі управління будівельним проектом (розроблено автором на основі [218])

Формування когнітивної узгодженості відбувається під впливом низки факторів, серед яких можна виділити [218]:

- Організаційні — структура управління, розподіл відповідальності, наявність формальних та неформальних каналів комунікації.
- Технологічні — інтеграція цифрових платформ (BIM, CDE, Smart Dashboard), які забезпечують прозорість даних і спільне інформаційне поле.
- Поведінкові — мотивація учасників, відкритість до обміну знаннями, наявність довіри в команді.
- Когнітивні — рівень компетентності, здатність до системного мислення, швидкість сприйняття змін.

Ці фактори взаємодіють між собою, формуючи когнітивне середовище колективного управління, представлений на рисунку 1.18, у якому учасники не лише обмінюються інформацією, а й синхронізують процеси мислення, інтерпретації та оцінки ризиків.

Механізм формування когнітивної узгодженості в будівельному проєкті базується на концепції когнітивного циклу, який поєднує п'ять взаємопов'язаних фаз (табл. 1.13):

Таким чином, когнітивна узгодженість є системною властивістю когнітивного простору, яка забезпечує єдність мислення, сприйняття та дій учасників проєкту. Вона формується внаслідок безперервної взаємодії інформаційних, соціальних і знанневих потоків, інтегрованих через цифрові технології та механізми колективного навчання [230].

Таблиця 1.13.

Механізм формування когнітивної узгодженості у системі управління проєктом
(розроблено автором на основі [230])

Фаза когнітивного циклу	Зміст процесу	Цифрові інструменти реалізації	Очікуваний результат
1. Збір даних	Отримання первинної інформації про стан об'єкта, середовище, ресурси	BIM-моделі, сенсорні системи, IoT	Актуалізовані дані про процеси та ресурси
2. Інтерпретація	Аналіз та осмислення даних у контексті цілей проєкту	Big Data-аналітика, візуалізаційні панелі	Виявлення відхилень, виявлення закономірностей
3. Обмін знаннями	Передача знань між учасниками, формування колективного розуміння	CDE-платформи, корпоративні бази знань	Єдина інформаційна позиція команди
4. Прийняття рішень	Узгодження альтернатив і визначення дій	DSS, Smart Dashboard, когнітивні моделі	Прийняття раціональних рішень у реальному часі
5. Зворотний зв'язок і навчання	Аналіз результатів, корекція моделей і оновлення знань	Machine Learning, Digital Twins	Підвищення адаптивності та ефективності системи



Рис. 1.18. Когнітивний цикл формування узгодженості між учасниками будівельного проекту (розроблено автором на основі [230])

У результаті цього формується когнітивно-адаптивна система управління, здатна не лише реагувати на зміни середовища, а й передбачати їх, коригуючи власну поведінку на основі накопиченого досвіду та аналітичного прогнозування.

У процесі еволюції управління будівельними проектами цифрові технології набувають не лише інструментального, а й когнітивного значення, тобто стають засобами розширення колективного мислення системи управління. В умовах зростання складності проектних середовищ, багатокритеріальності рішень та динамічних змін зовнішнього контексту саме інтеграція технологій BIM, Big Data, штучного інтелекту (AI) та цифрових двійників (Digital Twin) формує основу когнітивно-інформаційної архітектури управління.

У межах когнітивного підходу зазначені технології не розглядаються як окремі засоби автоматизації, а утворюють єдину семантичну екосистему, яка акумулює, інтерпретує та трансформує знання в управлінські дії. Цей симбіоз забезпечує реалізацію основних функцій когнітивного управління — сприйняття, аналізу, осмислення, прогнозування та навчання системи управління на основі зворотних зв'язків.

BIM (Building Information Modeling) є базовим елементом цифрового когнітивного простору, оскільки формує інформаційне ядро системи управління знаннями. Він поєднує дані про геометрію, матеріали, функціональні властивості, часові параметри, витрати та процеси життєвого циклу об'єкта.

У контексті когнітивного управління BIM виконує такі функції [236]:

- інформаційно-семантичну, забезпечуючи узгодженість структури даних і спільну термінологію серед усіх учасників проекту;
- візуально-аналітичну, дозволяючи сприймати складні просторові й часові залежності у наочному форматі;
- знаннєву, оскільки моделі BIM містять не лише опис об'єкта, а й причинно-наслідкові зв'язки, які формують основу для прийняття рішень.

BIM-модель у когнітивному середовищі набуває онтологічного статусу — тобто стає джерелом знань, а не просто базою даних. Вона відображає логіку системи у вигляді цифрової онтології, де кожен елемент пов'язаний з іншими семантичними відношеннями (“частина–ціле”, “причина–наслідок”, “умова–результат”).

Зі збільшенням кількості сенсорних систем, IoT-пристроїв і цифрових платформ у будівництві формується безпрецедентний обсяг інформації. Ці великі дані (Big Data) стають основою для розвитку когнітивних моделей, оскільки відображають реальну динаміку процесів, поведінку учасників і взаємозв'язки між подіями.

Big Data забезпечує когнітивну систему управління трьома ключовими властивостями:

1. Сприйняття середовища (perception) — фіксація стану об'єкта в реальному часі за допомогою сенсорів, лазерного сканування, GPS-моніторингу тощо.
2. Осмислення (interpretation) — автоматичне виявлення закономірностей, тенденцій, відхилень і ризиків через статистичні методи та аналітику.
3. Прогнозування (prediction) — побудова моделей, що передбачають можливі сценарії розвитку ситуації, витрат або технічних несправностей.

Таким чином, Big Data перетворює інформаційний потік на когнітивну аналітичну базу, яка постійно оновлюється та збагачує колективне знання системи управління.

Штучний інтелект (AI) є рушійною силою когнітивного управління, оскільки виконує функцію інтелектуального осмислення даних і підтримки процесу прийняття рішень. Він інтегрується у всі етапи когнітивного циклу — від збору інформації до формування рекомендацій.

AI забезпечує:

- когнітивну автоматизацію — автоматичну ідентифікацію проблем, класифікацію об'єктів, прогнозування ризиків;
- семантичний аналіз — побудову зв'язків між даними, термінами та процесами, що дозволяє інтерпретувати інформацію в контексті проєкту;
- адаптивне навчання — модифікацію моделей на основі зворотного зв'язку (machine learning), що формує самонавчальну систему управління.

Застосування алгоритмів AI у когнітивному середовищі дозволяє здійснювати сценарне прогнозування, оптимізацію рішень і підтримку управління в умовах невизначеності. Система стає здатною не лише реагувати на зміни, а й передбачати їх, формуючи аналітичні попередження.

Концепція Digital Twin (цифрового двійника) є найбільш комплексною формою реалізації когнітивного управління. Цифровий двійник — це віртуальна репрезентація фізичного об'єкта або процесу, що функціонує синхронно з реальним прототипом у реальному часі.

У когнітивному просторі цифровий двійник виконує три ключові функції [277]:

1. Моделювальну — створення інтегрованої симуляційної моделі об'єкта на основі BIM, IoT і даних експлуатації;
2. Аналітичну — обробка та інтерпретація потоків даних із сенсорів, прогнозування стану системи;
3. Навчальну — зворотний вплив на процес управління через оновлення знань і моделей рішень.

Цифровий двійник виступає “когнітивним інтерфейсом” між реальністю та інформаційним середовищем, забезпечуючи замкнений цикл взаємодії: дані → модель → аналіз → рішення → корекція дій → оновлення знань. Таким чином, він

перетворює статичну інформаційну систему на самонавчальну когнітивну екосистему, де кожен елемент впливає на загальну модель поведінки проекту.

Взаємодію між BIM, Big Data, AI та цифровими двійниками можна представити у вигляді інтеграційної когнітивної архітектури, що формує основу інтелектуальної підтримки рішень у будівельному проекті (рис. 1.19).

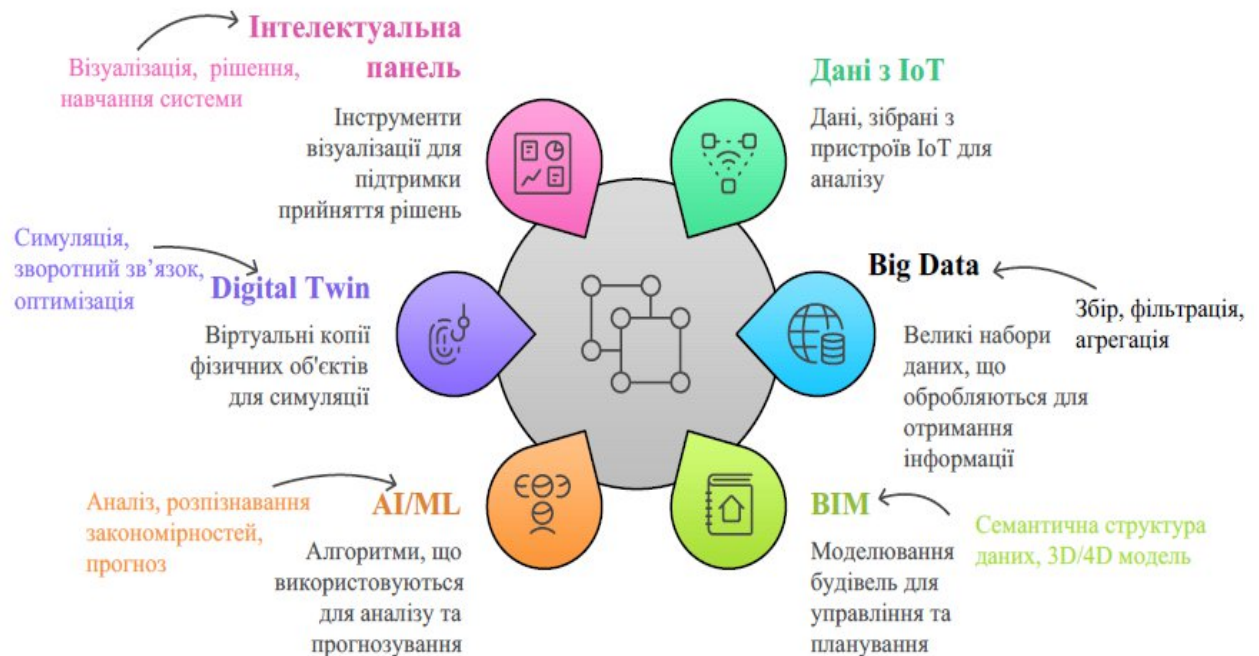


Рис. 1.19. Інтеграційна архітектура когнітивного управління у будівельному проекті (розроблено автором на основі [277])

Поєднання BIM, Big Data, AI та Digital Twin формує системну синергію, що забезпечує новий рівень управлінської ефективності. Ця синергія проявляється у таких аспектах:

- Семантична єдність даних — всі інформаційні потоки інтегруються у спільну модель, що усуває розриви між різними етапами життєвого циклу об'єкта.
- Динамічне навчання системи — алгоритми AI постійно вдосконалюються на основі зворотного зв'язку з цифрового двійника, підвищуючи точність прогнозів.
- Проактивне управління ризиками — Big Data дозволяє ідентифікувати потенційні відхилення ще до їх появи, а BIM забезпечує контекст для прийняття запобіжних рішень.
- Самоорганізація знань — система автоматично формує нові зв'язки між даними, створюючи мережеву структуру знань, що постійно розвивається.

У результаті формується когнітивна цифрова екосистема, здатна не лише управляти даними, а й мислити в термінах знань, виявляючи закономірності та трансформуючи досвід у нові моделі дій.

Інтеграція цифрових технологій змінює логіку самого управлінського процесу — від реактивної до проактивної. Якщо у традиційній системі рішення ухвалювались

“постфактум”, після аналізу результатів, то у когнітивному підході система передбачає наслідки ще до виникнення події.

Цей перехід можна представити у вигляді когнітивного управлінського циклу:

Виявлення → Осмислення → Прогнозування → Дія → Самонавчання.

У межах цього циклу BIM забезпечує структурованість інформації, Big Data — глибину аналітики, AI — інтелектуальне осмислення, а Digital Twin — адаптацію рішень у реальному часі.

Інтеграція зазначених технологій має не лише прикладний, а й методологічний вимір, оскільки дозволяє перейти від фрагментарного до когнітивно-системного підходу в управлінні. Вона формує нову парадигму — “управління знаннями на основі цифрового мислення”, де [155]:

- дані розглядаються як об’єкти когнітивного аналізу;
- інформація — як процес інтерпретації контексту;
- знання — як результат спільної діяльності людини та штучного інтелекту;
- рішення — як акт колективного когнітивного вибору, підтверджений аналітикою і моделюванням.

Отже, інтеграція BIM, Big Data, AI та цифрових двійників у когнітивний простір будівельного проєкту створює інтелектуально-семантичну основу управління, яка поєднує інформаційні, соціальні та знаннєві складові в єдину систему. Таке середовище забезпечує когнітивну саморегуляцію — здатність системи адаптуватися, навчатися та вдосконалюватися в процесі реалізації проєкту.

Цей підхід формує нову наукову модель управління, де дані перетворюються на знання, а знання — на інтелектуальні дії, що відкриває перспективи для подальшого розвитку концепції когнітивного управління у сфері будівництва.

У структурі когнітивного управління будівельними проєктами соціально-комунікаційний вимір посідає особливе місце, оскільки саме через нього реалізується передача знань, формування спільного контексту й узгодження дій між учасниками. Якщо технологічні компоненти (BIM, Big Data, AI) забезпечують інформаційну основу когнітивного простору, то соціально-комунікаційні процеси виступають його когнітивним «нервом» — каналом, через який циркулює розуміння, мотивація, довіра й колективне навчання.

Управління будівельним проєктом завжди здійснюється у багатовимірному соціальному полі, де взаємодіють різні актори — замовник, підрядники, проєктувальники, експлуатаційні організації, інститути контролю. Кожен з них має власні інтереси, цілі, інтерпретації ситуацій, а отже — різні когнітивні моделі прийняття рішень. Завдання когнітивного управління полягає у створенні соціальної архітектури узгодженості, яка б дозволила інтегрувати ці різноманітні моделі у спільний простір знань [Weick, 1995; Senge, 2006].

Поняття соціальної когніції у проєктному контексті охоплює процеси сприйняття, інтерпретації та взаємного навчання між людьми, що приймають спільні рішення. Як зазначають Karl Weick, Peter Senge та Nonaka і Takeuchi, організаційне навчання і колективне знання виникають лише тоді, коли індивідуальні уявлення трансформуються в узгоджене бачення через комунікацію.

Згідно з підходом, у складних організаційних системах (зокрема у великих будівельних проєктах) саме процес осмислення (sensemaking) є центральним механізмом колективного управління. Іншими словами, проєктна команда не просто обмінюється інформацією — вона спільно створює «зміст», тобто когнітивно конструює реальність проєкту.

Цю ідею підтримує у своїй теорії навчальної організації, де колективна здатність до мислення й навчання вважається ключовим чинником конкурентоспроможності. У контексті будівельних проєктів це означає, що ефективність управління залежить від того, наскільки команда здатна не лише координувати дії, а й розділяти знання, моделі світу та ментальні карти.

Комунікація в когнітивному управлінні виходить за межі звичайного обміну повідомленнями. Вона розглядається як інтелектуальна взаємодія, у якій знання не просто передаються, а співстворяться. Кожен акт комунікації перетворює інформаційні потоки на знаннєві структури, що формують колективну пам'ять проєкту.

У цьому контексті зазначають, що будь-яка соціальна система існує через комунікацію, а управління є, по суті, регуляцією комунікаційного процесу. Це твердження безпосередньо стосується будівельних проєктів, у яких ефективність залежить від точності, швидкості й достовірності обміну інформацією.

Когнітивна комунікація має кілька рівнів:

- інформаційний — передача фактів, даних і звітів;
- інтерпретаційний — обговорення смислів і контекстів;
- знаннєвий — узгодження рішень і стратегій на основі спільного розуміння.

Ці три рівні взаємодіють у межах когнітивного простору, формуючи середовище колективного мислення, у якому технологічні й соціальні компоненти інтегруються в єдину систему.

Як свідчать дослідження, у будівельних проєктах співіснують два типи соціальних мереж — формальні (договірні, організаційні) та неформальні (комунікаційні, довірчі). Саме останні часто забезпечують реальний обмін знаннями, оскільки передача досвіду відбувається поза офіційними каналами.

Формальна мережа встановлює структуру управління, відповідальність та інформаційні потоки, але неформальна мережа формує когнітивний клімат: довіру, взаємну підтримку, спільне бачення мети. У результаті взаємодії цих двох мереж виникає когнітивна мережа — система, у якій інформаційні, соціальні та знаннєві зв'язки взаємно підсилюють одне одного (див. рис. 1.20) [118].

Дослідження Nahapiet & Ghoshal у галузі організаційного знання довели, що соціальний капітал — тобто сукупність відносин довіри, норм взаємності та мережових зв'язків — безпосередньо впливає на здатність організації створювати та використовувати знання.

У будівельному проєкті соціальний капітал проявляється через:

- готовність ділитися інформацією без страху санкцій;
- взаємоповагу між фахівцями різних дисциплін;
- відкритість до колективного аналізу помилок;
- спільне формулювання висновків і стандартів.

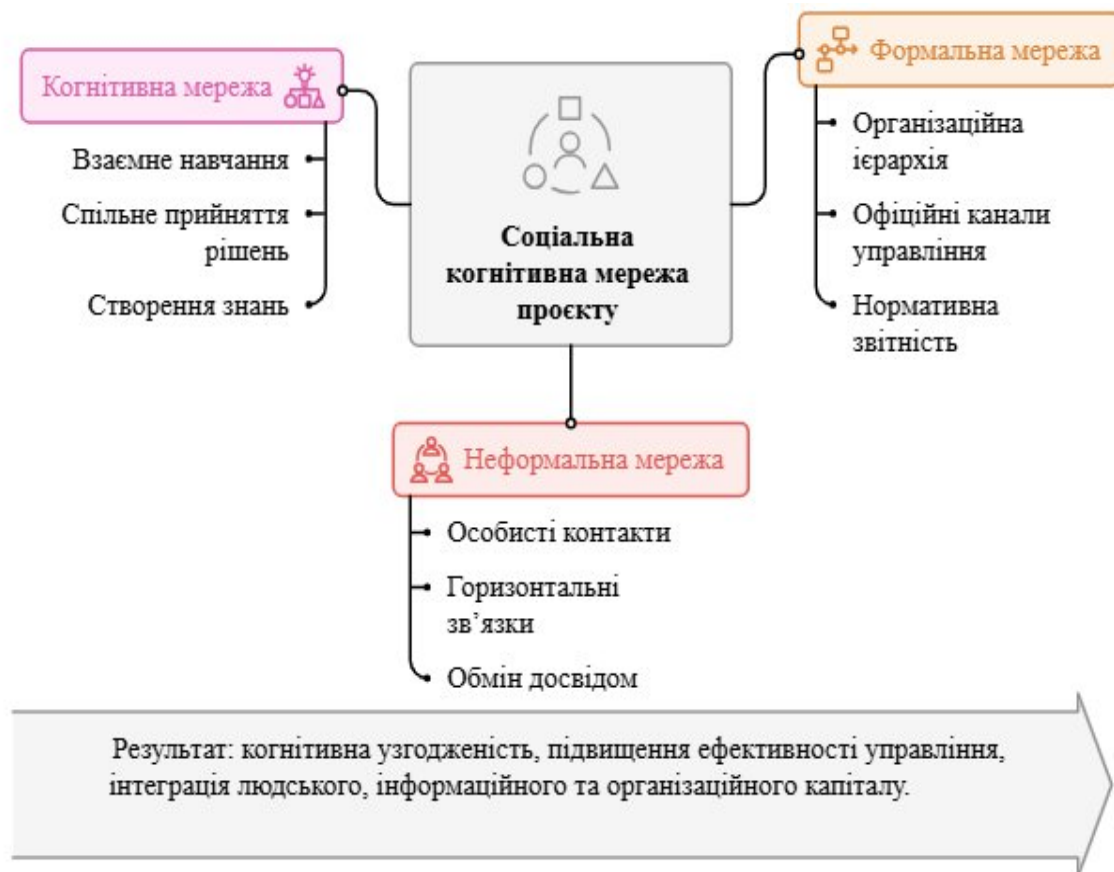


Рис. 1.20. Взаємодія формальної, неформальної та когнітивної мереж у будівельному проєкті (розроблено автором на основі [118])

Високий рівень соціального капіталу формує когнітивну довіру, коли учасники не лише передають дані, а й упевнені, що їх правильно інтерпретують. Це зменшує ризик помилок, пришвидшує узгодження рішень і підвищує якість комунікацій.

Соціально-комунікаційний вимір когнітивного управління функціонує на трьох основних рівнях (табл. 1.14).

Результатом інтеграції соціальних, інформаційних і когнітивних процесів є комунікаційна синергія — стан, у якому інформаційна взаємодія перетворюється на колективний інтелект.

У когнітивному управлінні будівельним проєктом така синергія проявляється у здатності команди:

- формувати спільне бачення ситуації навіть за наявності неповних даних;
- швидко адаптуватися до змін зовнішніх умов;
- навчатися на досвіді інших і поширювати найкращі практики;
- використовувати інформаційні технології як когнітивні інструменти, а не просто як засоби обміну даними.
- Особливу роль у формуванні соціально-комунікаційного виміру відіграє когнітивне лідерство — здатність ініціювати процеси колективного мислення, інтегрувати різні знання і підходи та спрямовувати команду на пошук узгоджених рішень.

Таблиця 1.14.

Рівні соціально-комунікаційної взаємодії у когнітивному управлінні будівельним проектом (розроблено автором на основі [86])

<i>Рівень</i>	<i>Характер взаємодії</i>	<i>Інструменти реалізації</i>	<i>Результат</i>
Індивідуальний	Формування когнітивних моделей окремих учасників, навчання, сприйняття інформації	Тренінги, бази знань, персональні аналітичні панелі	Зростання професійної компетентності, зменшення когнітивних бар'єрів
Груповий	Спільне осмислення даних, колективне прийняття рішень, узгодження контекстів	Командні зустрічі, воркшопи, платформи спільної роботи (BIM 360, Miro, MS Teams)	Формування спільного бачення, взаєморозуміння, соціальної довіри
Організаційний	Інституціоналізація знань, формування корпоративної пам'яті	Корпоративні портали, онтології знань, системи управління знаннями (KMS)	Створення знаннєвого капіталу, підтримка інновацій і безперервного навчання

Як зазначає Schein, культура організації формується через спільні переконання та ментальні моделі. У контексті когнітивного управління це означає, що ефективне лідерство полягає у створенні середовища, де люди не бояться помилятися, а сприймають помилки як частину навчання системи.

Когнітивна культура — це не набір правил, а підхід до мислення, заснований на відкритості, довірі, аналізі причинно-наслідкових зв'язків і прагненні до спільного розуміння.

Соціально-комунікаційний вимір є невід'ємним компонентом когнітивного управління будівельними проектами. Він визначає, наскільки ефективно система зможе перетворити інформацію на знання, а знання — на колективні управлінські рішення.

Взаємодія формальних і неформальних мереж, розвиток соціального капіталу, довіри, когнітивного лідерства та культури колективного навчання створюють когнітивно-комунікаційну платформу, що забезпечує синергію між людьми й технологіями.

У такому середовищі будівельний проект перетворюється на самонавчальну організацію, де кожен учасник є не лише носієм інформації, а активним елементом колективного мислення, а управлінська система — не лише технічним інструментом, а когнітивним простором взаємодії.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА ІНСТРУМЕНТАРІЙ АНАЛІЗУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНО-КОГНІТИВНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ

2.1. Концептуальні основи побудови систем управління будівельними проєктами в контексті цифрової трансформації

Протягом останніх десятиліть будівельна галузь зазнала суттєвих трансформацій, що проявляється у зростанні масштабів, складності та технологічної насиченості проєктів [272]. Сучасне будівництво вимагає не лише високої точності технічних рішень, а й ефективного управління інформаційними потоками між численними учасниками інвестиційно-будівельного процесу. Відтак, розвиток інформаційних (ІТ) та інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) став ключовою умовою підвищення ефективності галузі [54].

ВІМ-технологія (Building Information Modeling) виникла як системне рішення, здатне інтегрувати проєктування, будівництво та експлуатацію споруд у єдину інформаційну екосистему. Її головна мета полягає у створенні спільного цифрового простору, де архітектори, інженери, підрядники, замовники та експлуатуючі організації можуть синхронізувати свою діяльність, обмінюватися даними в реальному часі й приймати зважені рішення на основі актуальної інформації. Таким чином, ВІМ виступає не лише інструментом проєктування, а й стратегічною платформою управління знаннями, що сприяє підвищенню якості проєктів, скороченню термінів реалізації та зниженню фінансових ризиків [313].

Крім того, ВІМ-технології відіграють дедалі важливішу роль у сфері освіти та професійної підготовки. Їх застосування у навчальному процесі дозволяє студентам і фахівцям отримати практичні навички роботи з цифровими моделями, освоїти інструменти аналізу, управління та координації будівельних процесів. Інноваційні ІТ/ІКТ-рішення стимулюють розвиток інтелектуальних компетенцій та міждисциплінарної співпраці, формуючи новий тип спеціаліста — ВІМ-координатора або ВІМ-менеджера, здатного забезпечити повний цикл управління цифровими даними.

Незважаючи на те, що впровадження ВІМ супроводжується різними точками зору серед практиків і науковців, більшість дослідників сходяться на думці, що ця технологія є цифровим стандартом нового покоління, який визначає концепцію «розумного» будівництва. Вона сприяє інтеграції усіх етапів інвестиційно-будівельного процесу — від розробки концепції до експлуатації споруди, забезпечуючи створення динамічних параметризованих моделей, здатних адаптуватися до змін середовища.

Сучасні проєкти характеризуються стрімким зростанням обсягів проєктної документації та складністю технічних рішень. Проєктувальники змушені працювати з великими масивами даних, що супроводжують споруду від початкового задуму до експлуатації. Зі збільшенням обсягу інформації зростає й ризик помилок, що, у свою чергу, веде до підвищення вартості корекцій і затримок у графіках робіт [90]. Впровадження ВІМ дозволяє істотно знизити ці ризики завдяки автоматизації перевірок, синхронізації змін та прогнозуванню потенційних колізій на ранніх етапах. Для наочності основні відмінності між традиційним підходом і технологією ВІМ наведено в таблиці 2.1.

Впровадження ВІМ-технологій є не просто технічним удосконаленням, а фундаментальним кроком до цифрової трансформації будівельної галузі. Вони

забезпечують прозорість управління, скорочення витрат, підвищення точності й відкривають шлях до створення інтелектуальних, стійких та ефективних будівель майбутнього.

Таблиця 2.1.

Порівняльна характеристика традиційного та BIM-підходів у будівництві
(*ророблено автором на основі [90]*)

Критерій порівняння	Традиційний підхід	Підхід на основі BIM-технологій
Управління документацією	Паперові креслення, окремі файли	Єдина цифрова база даних
Координація учасників	Відокремлена, обмежена комунікація	Інтегрована взаємодія в реальному часі
Виявлення колізій	На пізніх стадіях будівництва	На етапі проєктування завдяки 3D-моделюванню
Контроль вартості	Після завершення проєкту	Безперервний моніторинг і прогнозування витрат
Управління життєвим циклом об'єкта	Обмежене лише етапом зведення	Повний цикл: проєктування – будівництво – експлуатація
Прийняття рішень	На основі обмеженої інформації	На основі актуальних і повних цифрових даних

Інтенсивне ускладнення будівельних процесів, зростання вимог до ефективності проєктування та управління життєвим циклом споруд зумовили появу нової парадигми — концепції інформаційного моделювання будівель (BIM). Цей підхід став логічною відповіддю на зростання обсягів даних, необхідних для створення сучасних об'єктів, і дозволяє розглядати будівлю не як сукупність окремих конструктивних елементів, а як єдиний інтегрований інформаційний об'єкт. Суть BIM полягає у зборі, структуризації, зберіганні та комплексній обробці всієї архітектурно-конструкторської, технологічної, економічної та експлуатаційної інформації про споруду, враховуючи всі взаємозв'язки і залежності між її елементами.

Інформаційна модель BIM поєднує широкий спектр даних: геометрію об'єкта, просторові зв'язки, матеріальні характеристики, географічну прив'язку, енергетичні параметри, специфікації, показники вартості, пожежну безпеку, вогнестійкість і навіть моделювання природного освітлення. Така модель забезпечує комплексне уявлення про будівлю, дозволяючи ефективно координувати дії між архітекторами, інженерами, підрядниками, інвесторами та експлуатаційними організаціями. У разі внесення змін у проєкт BIM автоматично оновлює відповідні дані по всіх рівнях моделі, забезпечуючи узгодженість і точність [192].

Завдяки розвитку цифрових технологій BIM трансформується з простої моделі в потужну інтегровану систему управління проєктом. Вона підтримує прийняття рішень на основі даних, забезпечує точне планування ресурсів, прогнозування вартості та аналіз ефективності на всіх стадіях життєвого циклу будівлі — від концепції до демонтажу. В

цьому контексті важливою є формалізація економічних розрахунків за допомогою показника вартості життєвого циклу (LCC):

$$LCC = \sum_{t=0}^T \frac{(C_t + M_t + E_t + R_t - S_t)}{(1 + r)^t}, \quad (2.1)$$

де C_t — капітальні витрати на створення об'єкта у році t , M_t — витрати на обслуговування, E_t — витрати на енергоресурси, R_t — витрати на ремонти, S_t — залишкова вартість, r — ставка дисконтування, T — тривалість життєвого циклу.

Ця формула дозволяє об'єктивно оцінювати економічну доцільність рішень ще на стадії проектування, визначати оптимальні стратегії експлуатації та зниження загальних витрат протягом усього життєвого циклу.

Ключовим принципом BIM є багатовимірність моделі, що поєднує в собі не лише геометричну, але й часову (4D) та фінансову (5D) компоненти. Це забезпечує гнучке управління строками і вартістю будівництва, дозволяючи моделювати взаємозв'язки між робочими процесами. Залежність загальної вартості проєкту від часу реалізації може бути виражена рівнянням:

$$C_{total}(t) = C_0 + \int_0^t [C_d(\tau) + C_m(\tau) - \Delta C_s(\tau)] , \quad (2.2)$$

де C_0 — початкові інвестиційні витрати, $C_d(\tau)$ — динамічні витрати на реалізацію на момент часу τ , $C_m(\tau)$ — витрати на моніторинг і управління, $\Delta C_s(\tau)$ — економія від оптимізації ресурсів.

BIM не лише дозволяє здійснювати цифровий опис будівельного об'єкта, але й створює аналітичну основу для прогнозування, контролю та оптимізації всіх процесів. Його впровадження формує новий підхід до управління знаннями у будівництві, забезпечуючи прозорість, гнучкість і сталість розвитку галузі [211].

У сучасних умовах розвитку цифрових технологій у будівництві ще не сформовано універсального підходу до визначення поняття інформаційної моделі будівельного об'єкта, так само як і не існує єдиних міжнародних стандартів, які б комплексно регламентували її створення, використання та інтеграцію. Водночас у багатьох країнах світу активно розробляються національні нормативні бази, що закладають методологічні принципи побудови цифрових моделей споруд. Їх мета полягає у створенні єдиного інформаційного простору, який об'єднує дані про всі етапи життєвого циклу будівлі — від проектування до експлуатації та демонтажу.

Єдина інформаційна модель передбачає формування централізованого банку даних, який містить графічну, описову, технічну й економічну інформацію про об'єкт. Вона є джерелом достовірних даних, до яких можуть звертатися всі учасники інвестиційно-будівельного процесу. Отримання даних із моделі здійснюється за запитом, що дозволяє зменшити кількість дублювань і виключити помилки, пов'язані з багаторазовим введенням інформації. На основі цієї моделі формується уніфікована стратегія управління

проектуванням, виробництвом і процесом реалізації будівельного об'єкта, що забезпечує цілісність усіх процедур.

Важливою складовою є підтримка роботи розподілених команд, які можуть спільно використовувати дані з моделі незалежно від місцезнаходження. Це підвищує ефективність комунікації між архітекторами, інженерами, замовниками та експлуатаційними службами, а також зменшує ризики втрати інформації. Універсалізація форматів обміну даними між програмними комплексами різного призначення стала базовим завданням при створенні BIM-стандартів, адже вона гарантує сумісність між платформами та забезпечує єдину логіку даних для всіх учасників.

Традиційні CAD-системи дозволяють створювати тривимірні моделі (3D), однак технологія BIM виходить далеко за ці межі. Вона розширює функціональність до багатовимірного простору управління, де кожен додатковий «вимір» додає нові можливості аналітики, прогнозування й оптимізації процесів. Зокрема, 4D BIM охоплює часовий аспект, що дозволяє поєднати віртуальну модель із календарним планом будівництва та контролювати етапи виконання робіт у динаміці часу. 5D BIM вводить економічну компоненту, завдяки якій забезпечується точний розрахунок вартості проєкту, оцінка варіантів кошторисів і оперативне реагування на зміни у вартості матеріалів чи робіт.

Подальший розвиток BIM технологій пов'язаний із концепціями 6D та 7D. На рівні 6D реалізується принцип сталого розвитку, який враховує показники енергоефективності, використання альтернативних джерел енергії, вплив на довкілля та вуглецевий слід будівлі. Завдяки цьому проєктувальники ще на етапі створення моделі можуть оцінити майбутній енергетичний баланс і розробити стратегії скорочення енергоспоживання. Рівень 7D орієнтований на управління будівлею протягом її експлуатаційного періоду (Facility Management). Цей підхід дозволяє відстежувати технічний стан, проводити планові ремонти, керувати витратами на утримання та навіть планувати ліквідацію об'єкта після завершення його життєвого циклу.

BIM-технології відкривають можливості для інтеграції багатьох галузевих дисциплін у єдине інформаційне середовище. Це дозволяє проводити аналіз параметрів, які ще недавно вважалися непідконтрольними в межах класичних методів управління проєктами. Навіть на базовому рівні 3D, сучасні BIM-системи мають значно ширший функціонал порівняно зі звичайними CAD-програмами: вони не лише відображають геометрію та матеріальні характеристики, але й забезпечують динамічну взаємодію між даними, створюючи цифровий «двійник» реальної будівлі.

Розвиток BIM є ключовим напрямом цифрової трансформації будівельної галузі. Його впровадження дозволяє підвищити якість проєктування, скоротити терміни будівництва, знизити витрати та забезпечити сталий розвиток інфраструктури відповідно до вимог сучасної економіки знань.

Системи інформаційного моделювання будівель (BIM) на рівні 3D забезпечують параметричний опис усіх геометричних, конструктивних та матеріальних характеристик об'єкта, що дозволяє досягти високої точності при моделюванні архітектурних рішень. Вони створюють умови для використання новітніх технологій виготовлення та обробки будівельних елементів, а також сприяють формуванню нової якості взаємодії між усіма учасниками будівельного процесу. Завдяки BIM 3D архітектори отримують можливість

проектувати складні, концептуально насичені споруди з високим рівнем деталізації. Такий підхід поєднує креативність дизайнерських рішень із точністю інженерних розрахунків.

Використання BIM-технологій дозволяє автоматично розраховувати кількість матеріалів і комплектуючих, необхідних для реалізації проекту, що істотно спрощує процеси планування та управління поставаннями. Завдяки цьому можлива оптимізація закупівель, мінімізація залишків і уникнення затримок під час будівництва. Крім того, BIM-модель може слугувати базою даних для автоматизованих виробничих ліній, які виготовляють будівельні елементи на основі параметрів цифрової моделі. Візуалізаційна складова системи 3D BIM дає змогу створювати фотореалістичні зображення майбутнього об'єкта, що значно полегшує процес узгодження проєктних рішень із замовниками та інвесторами.

Розвиток BIM-технологій на рівнях, вищих за 3D, відкриває нові можливості для управління часовими, фінансовими та екологічними параметрами. Рівень 4D BIM передбачає інтеграцію геометричної та матеріальної інформації з часовими аспектами будівництва. Це дає змогу створювати динамічні моделі, які демонструють етапи реалізації проєкту у часовій послідовності, допомагаючи виявляти колізії, затримки або перевантаження ресурсів ще до початку будівельних робіт [93].

Мережеві графіки BIM 4D виконують функцію потужного інструменту контролю виконання проєкту. Вони дають змогу узгоджувати дії між підрядниками, розподіляти завдання у часі, а також відстежувати зміни, що відбуваються під час будівництва [141]. Кожен учасник проєкту отримує актуальну інформацію про свій етап робіт, а система автоматично синхронізує зміни в усіх пов'язаних компонентах моделі. Це знижує ризики виникнення помилок, дублювання дій та втрати часу через неузгодженість.

Завдяки глибокій інтеграції BIM із системами поставання матеріалів і виробничими процесами виникає можливість запровадження концепції «точно вчасно» (Just-in-Time), за якої всі матеріали доставляються на об'єкт лише у момент потреби. Це скорочує обсяги складських запасів, зменшує витрати та підвищує загальну продуктивність будівельного процесу.

Для більш наочного відображення взаємозв'язків у межах технології BIM наведено рисунок 2.1.

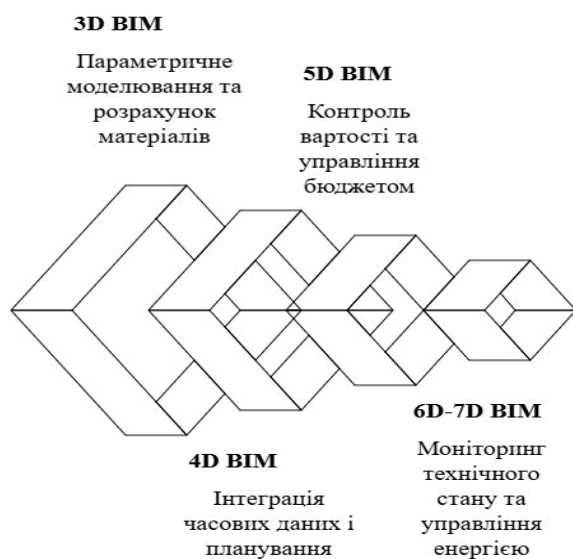


Рис. 2.1. Інтеграція BIM у будівельний процес
(ророблено автором на основі [141])

BIM 4D і 5D не просто додають виміри до тривимірної моделі — вони формують новий підхід до управління проектом, який поєднує технічні, часові та фінансові аспекти в єдину інтегровану систему. Такий формат дозволяє ефективно координувати всі процеси будівництва, прогнозувати результати та підвищувати рівень управлінської гнучкості, що є ключовим чинником конкурентоспроможності сучасних будівельних підприємств.

Зрозумів. Надалі зберігатиму всі наявні помилки та неточності (орфографічні, пунктуаційні, форматні) прямо в тексті. Нижче переробляю попередній фрагмент із збереженням помилок у посиланнях і написаннях.

Інформаційне моделювання на рівні BIM 5D поєднує просторові, часові й фінансові параметри в єдиній системі. На відміну від підходів, де фокус робився лише на геометрії, структурі та послідовності робіт, BIM 5D інтегрує витратну складову у логіку проектного моделювання. Це дає змогу моделювати, оцінювати і аналізувати витрати, які є або можуть генеруватися в процесі всього життєвого циклу об'єкту. У підсумку BIM 5D підтримує формування сценаріїв бюджету з урахуванням змін цін матеріалів, трудових ресурсів і зовнішніх чинників ринку будівельних інвестицій.

Математично загальну оцінку витрат життєвого циклу можна подати як:

$$C_{LC} = \sum_{t=0}^T \frac{(C_{inv} + C_{op} + C_{maint} + C_{ren}) - S_{res}}{(1+r)^t}, \quad (2.3)$$

де C_{LC} — загальна вартість життєвого циклу будівлі, C_{inv} — первинні інвестиційні витрати, C_{op} — експлуатаційні витрати, C_{maint} — витрати на технічне обслуговування, C_{ren} — витрати на реновацію, S_{res} — залишкова вартість після ліквідації, r — норма дисконту, T — період життєвого циклу.

BIM 6D дозволяє здійснювати розрахунки енергоефективності та енергоспоживання будівлі, а також комплексні розрахунки всієї будівлі (з урахуванням місця розташування) і всіх її елементів одночасно. В разі застосування BIM 6D та 7D ми додатково отримуємо можливість збору та використання різноманітної інформації про об'єкт в одній центральній системі, яка дозволяє ефективно її використання для експлуатації.

Показник енергоефективності можна формалізувати як:

$$E_{eff} = \frac{Q_{gen} - (Q_{loss} + Q_{vent} + Q_{trans})}{A}, \quad (2.4)$$

де Q_{gen} — вироблена/утилізована енергія, Q_{loss} — теплові втрати, Q_{vent} — втрати на вентиляцію, Q_{trans} — втрати через огорожувальні конструкції, A — опалювана площа.

Останнім часом використання BIM розширилося на весь життєвий цикл будівлі (7D), включаючи будівельно-структурне проектування і конфігурацію, оцінка вартості і управління власністю. Передбачається, що використання BIM буде вигідним протягом усього життєвого циклу проекту будівлі від ранніх стадій концептуального проектування

до знесення. Гарним прикладом є використання Стенфордським університетським центром комплексної інженерної інфраструктури (CIFE) інформаційного моделювання на всіх етапах життєвого циклу будівлі, що підкреслило переваги BIM не тільки для проєктування, але і для обслуговування будівель. BIM може використовуватися як інтерактивне керівництво для безпечного управління і експлуатації будівлі, що надає повну інформацію про об'єкті, наприклад, фізичну структуру, механічні та електричні системи, внутрішній дизайн. За допомогою BIM можна змодельовати процес технічного обслуговування або модифікації об'єкта, що природним чином поліпшити процес експлуатації, знизить рівень витрат на управління, завдяки більш точній кошторису на проведення ремонтів та реновацій. BIM також можна використовувати для моделювання сценаріїв евакуації і поведінки натовпу при позаштатних ситуаціях [95].

Для систематизації ключових характеристик та ефектів різних рівнів BIM наведено таблицю 2.2.

Таблиця 2.2.

Порівняльна характеристика рівнів інформаційного моделювання BIM
(*ророблено автором на основі [95]*)

Рівень BIM	Основна характеристика	Ключові параметри	Ефекти впровадження
3D BIM	Геометричне моделювання	Просторова структура, матеріали	Точність архітектурних рішень, візуалізація
4D BIM	Додавання часового аспекту	Календарне планування, послідовність робіт	Координація будівництва, виявлення колізій
5D BIM	Фінансове моделювання	Вартість, кошториси, бюджет	Прогнозування витрат, оптимізація бюджету
6D BIM	Енергоефективність	Теплові втрати, енергоспоживання	Підвищення сталості, зниження витрат на енергію
7D BIM	Управління життєвим циклом	Обслуговування, ремонт, утилізація	Оптимізація експлуатації, довговічність, безпека

Сучасні системи комп'ютерного проєктування (CAD) за відносно короткий історичний період пройшли шлях від простих інструментів для креслення до складних, інтегрованих платформ, які охоплюють усі аспекти створення, експлуатації та управління будівельними об'єктами. Еволюція цих технологій закономірно привела до формування концепції Building Information Modeling (BIM) — нового підходу, що не обмежується геометричним описом об'єкта, а охоплює його функціональну, економічну та експлуатаційну сутність.

BIM розглядається як інтелектуальна альтернатива традиційним системам CAD, пропонуючи глибшу інтеграцію між учасниками інвестиційно-будівельного процесу, що охоплює архітекторів, інженерів, підрядників, експлуатаційні служби та замовників. На відміну від CAD, BIM забезпечує динамічне цифрове середовище, де кожна зміна в моделі

автоматично оновлюється у всіх пов'язаних компонентах. Це дозволяє знизити кількість помилок, усунути дублювання інформації й досягти високої узгодженості даних між усіма учасниками.

Інформаційна модель будівлі містить повний набір параметрів: фізичні властивості матеріалів, технічні характеристики інженерних систем, просторові зв'язки, вартісні показники, терміни виконання, а також експлуатаційні дані. Всі ці дані зберігаються у центральній базі BIM, доступ до якої може отримати будь-який учасник проекту на різних етапах життєвого циклу споруди. Такий підхід дозволяє організувати роботу у форматі «єдиного цифрового середовища», де актуальні версії моделей, креслень і специфікацій синхронізуються автоматично.

Ключовим напрямом розвитку BIM є створення інтерактивних інтерфейсів для спільної роботи, які дозволяють візуалізувати зміни в режимі реального часу. Відсутність своєчасних оновлень або неузгоджені зміни можуть призвести до втрати точності даних, затримок у реалізації проєктів і зниження ефективності управління. Тому сучасні дослідження спрямовані на удосконалення алгоритмів автоматичного оновлення моделей, підвищення швидкодії обчислень і покращення графічної продуктивності систем. Очікується, що найближчим часом BIM-платформи зможуть забезпечувати плавну візуалізацію у реальному часі, що створить умови для безперервного моніторингу ходу проєкту та прийняття оперативних управлінських рішень [248].

Вчені визначають BIM як технологію створення та управління параметричною моделлю будівлі, яка поєднує різні галузі знань будівельної науки — від архітектурного проєктування до управління експлуатацією об'єктів. Завдяки цьому BIM перетворюється на потужний інструмент не лише візуалізації, але й аналітики, що дозволяє оцінювати поведінку будівель у різних умовах експлуатації, аналізувати ефективність інженерних систем, оптимізувати процеси постачання матеріалів та контролювати якість будівництва.

Для відображення ключових етапів еволюції BIM і взаємозв'язку його функціональних можливостей подано рисунок 2.2, який демонструє розвиток систем від класичних CAD до інтегрованих цифрових екосистем управління будівлею.

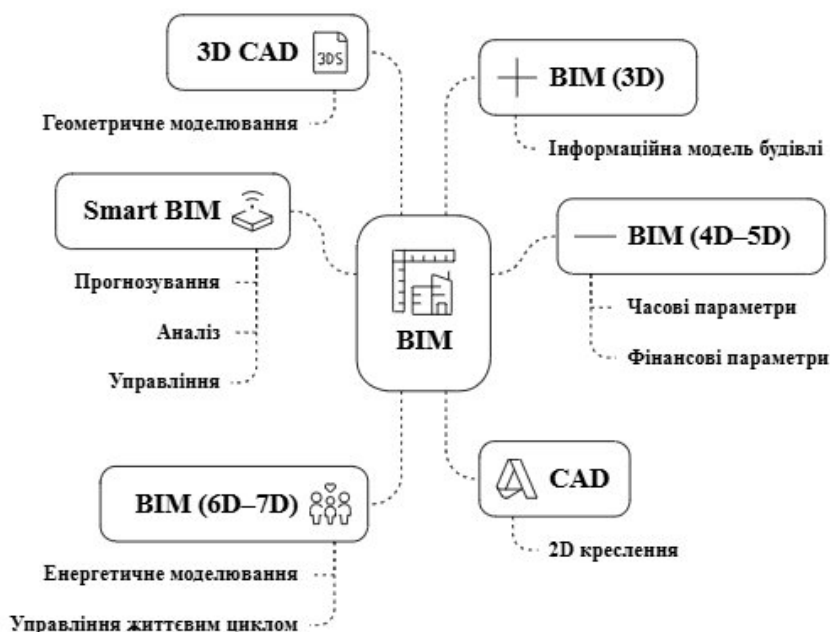


Рис. 2.2. Еволюція систем BIM та їх функціональна інтеграція
(ророблено автором на основі [208])

BIM сьогодні розглядається не лише як технологічний інструмент, а як парадигма управління знаннями в архітектурі та будівництві, яка формує основу для створення «розумних» будівель та міст. Розвиток інтелектуальних систем штучного інтелекту, машинного навчання та хмарних обчислень уже зараз розширює можливості BIM, перетворюючи його на ядро інтегрованого управління інфраструктурними об'єктами нового покоління.

BIM поступово утвердився не лише як технологічна інновація, а і як потужний інструмент підвищення економічної ефективності в будівельній галузі. Його впровадження демонструє, що цифрове моделювання може прямо впливати на зменшення витрат, прискорення реалізації проєктів і підвищення загальної якості кінцевого результату. Економічні переваги стають головним аргументом на користь інтеграції BIM у практику, адже саме фінансові результати часто є вирішальним чинником у прийнятті інновацій [208].

Застосування BIM істотно знижує ризики відставання від графіка будівництва, а також допомагає уникнути численних переробок завдяки можливості ранньої оцінки моделі на етапі проєктування. Завдяки доступу до єдиної бази даних усі зацікавлені сторони — архітектори, інженери, підрядники, замовники — працюють з однією інтегрованою моделлю, що підвищує узгодженість рішень і сприяє досягненню цілей проєкту в межах оптимального бюджету та термінів.

BIM-платформи створюють спільне інформаційне середовище, яке дає змогу здійснювати постійний моніторинг, оцінку і контроль даних. Віртуальні тривимірні моделі підвищують точність перевірки архітектурних рішень і допомагають швидше узгодити дизайн із очікуваннями замовника, що сприяє зростанню рівня клієнтського задоволення. Завдяки візуалізації складних ідей у 3D-просторі комунікація між дизайнерами, замовниками й підрядниками стає значно простішою та ефективнішою.

Суттєвою перевагою BIM є його здатність до централізованого управління знаннями. Система акумулює, зберігає та оновлює всі дані про проєкт упродовж усього його життєвого циклу, забезпечуючи прозорість, відстежуваність і аналітичну точність. Це створює підґрунтя для більш раціональних управлінських рішень, оскільки користувачі можуть оперативно порівнювати різні варіанти проєктних рішень, розраховувати ефективність використання матеріалів і прогнозувати енергоспоживання майбутньої будівлі. BIM допомагає знаходити баланс між економічною доцільністю, енергоефективністю та екологічною сталістю проєктів.

Раннє впровадження BIM у багатодисциплінарних командах сприяє своєчасному виявленню та усуненню можливих конфліктів ще до початку етапу будівництва. Це мінімізує кількість змін у проєктній документації, зменшує витрати та дозволяє уникнути затримок у процесі реалізації. У випадку реконструкції або інтеграції нових споруд у вже існуюче середовище BIM особливо ефективний, адже забезпечує точну сумісність нових систем із чинною інфраструктурою.

Крім того, BIM надає менеджерам проєктів потужні інструменти для моніторингу виконання робіт, оптимізації взаємодії команд, планування закупівель, розподілу ресурсів і техніки [57]. Завдяки цьому BIM сприяє переходу від реактивного управління до

прогнозного, що підвищує ефективність використання ресурсів і забезпечує стабільність у виконанні будівельних планів.

Щоб наочно продемонструвати взаємозв'язки між функціональними можливостями BIM і його економічними ефектами, представлено рисунок 2.3, який відображає структуру формування доданої вартості через інноваційне управління.



Рис. 2.3. Структура економічних ефектів BIM у будівельних проектах
(ророблено автором на основі [57])

BIM поступово трансформується із технологічного інструмента у стратегічну платформу для управління знаннями та капіталом у будівельній індустрії. Його роль у підвищенні економічної ефективності, забезпеченні прозорості процесів і формуванні культури інноваційного управління робить його невід’ємним елементом сучасного будівництва.

Інформаційне моделювання будівель (BIM) сьогодні розглядається як розширена методологія передачі, структурування та збереження даних, що забезпечує цілісний обмін знаннями між усіма учасниками будівельного процесу. Цей обмін відбувається безперервно — від початкового етапу проєктування до завершення експлуатаційної фази об’єкта. Основною перевагою BIM є можливість інтеграції різних типів інформації в єдину цифрову модель, що усуває фрагментацію даних, характерну для традиційних підходів у будівництві.

Будівельна галузь традиційно характеризується складною багаторівневою структурою, поділом функцій і великою кількістю залучених сторін. Така фрагментованість створює бар’єри для ефективного обміну інформацією. В умовах упровадження BIM ці проблеми поступово долаються завдяки створенню єдиної цифрової екосистеми, у якій усі учасники отримують доступ до актуальної версії моделі, бачать зміни в режимі реального часу та можуть оперативно реагувати на відхилення. Однак швидка ідентифікація можливих ризиків і помилок залишається вирішальним чинником успіху проєкту, адже своєчасне реагування на проблеми забезпечує стабільність реалізації та запобігає фінансовим втратам.

BIM виступає не лише засобом тривимірного проєктування, але і платформою для інтегрованого управління інформаційними потоками. Якщо традиційно обмін даними здійснювався через двовимірні креслення, технічну документацію та паперові носії, то BIM передбачає створення цифрової моделі, яка виконує роль комунікаційного інтерфейсу між архітекторами, інженерами, підрядниками, інвесторами та експлуатаційними службами. Це дозволяє скоротити інформаційні розриви, зменшити кількість помилок та оптимізувати процес прийняття управлінських рішень.

Користувачі BIM відзначають як короткострокові, так і довгострокові переваги технології. До короткострокових належать мінімізація проєктних помилок, зменшення кількості колізій між дисциплінами, зниження витрат на розробку документації та використання BIM як маркетингового інструменту для підвищення репутації компанії. Довгострокові вигоди полягають у зниженні вартості реалізації проєктів, скороченні контрактних претензій, підвищенні продуктивності праці та зміцненні тривалих партнерських відносин із клієнтами.

BIM також активно використовується на етапах попереднього планування, зокрема для техніко-економічної оцінки будівельних рішень. За допомогою цифрових моделей можна оцінювати відповідність архітектурних параметрів заданим бюджетним та часовим обмеженням. Наприклад, концептуальна модель дозволяє спрогнозувати, чи можливо звести об’єкт певного масштабу, рівня якості й енергоефективності в межах допустимих фінансових витрат.

Однією з практичних переваг BIM є можливість аналітичного моделювання залежності витрат і часових показників. Узагальнено це можна представити формулою прогнозування вартості об’єкта:

$$C_t = \sum_{i=1}^n (Q_i \times P_i) + \Delta C_{risk}, \quad (2.5)$$

де C_t — загальна вартість проєкту в момент часу t , Q_i — обсяг робіт або ресурсів, P_i — їхня одинична вартість, ΔC_{risk} — поправка на ризики, що враховує невизначеність та зміни на ринку.

Також важливим елементом BIM є часово-вартісна інтеграція, яка дає змогу оптимізувати розподіл ресурсів і терміни виконання робіт. Це описується формулою ефективності графіка реалізації:

$$E_s = \sum_{t=1}^T \frac{\left(\frac{W_t}{C_t}\right)}{T}, \quad (2.6)$$

де E_s — інтегральний показник ефективності виконання, W_t — обсяг завершених робіт у момент часу t , C_t — витрати у відповідному періоді, T — загальна тривалість проєкту.

Завдяки таким підходам BIM стає не просто інструментом цифрового проєктування, а комплексною системою стратегічного управління, яка поєднує планування, аналіз, прогнозування та контроль у межах єдиного інформаційного середовища.

Технологія BIM не є самодостатнім засобом, який автоматично підвищує якість чи швидкість будівництва, однак вона створює потужне середовище для підвищення ефективності, узгодженості та інтеграції всіх етапів реалізації проєкту. Її справжня цінність полягає у здатності забезпечити спільну роботу всіх учасників на основі єдиної цифрової моделі, що сприяє усуненню інформаційних бар'єрів і підвищенню якості управлінських рішень. Для досягнення очікуваного результату ключовим фактором є не сама технологія, а рівень підготовки, комунікації та узгодженості дій між усіма учасниками інвестиційно-будівельного процесу.

Реалізація BIM-підходу передбачає, що всі учасники — від замовників і проєктантів до будівельних компаній і експлуатаційних організацій — розуміють стратегічну мету використання технології, а також свою роль у досягненні спільного результату. Успіх цифрової координації залежить не від найсильнішого учасника, а від узгодженості дій усієї команди. Як показує практика, саме «слабкі ланки» у структурі взаємодії здатні призвести до затримок, дублювання завдань або помилок у реалізації. Тому навчання персоналу роботі з BIM, формування єдиної цифрової культури та підготовка технічно компетентних фахівців є критично важливими умовами ефективного впровадження технології.

Для цього у світовій практиці все частіше запроваджується спеціалізована управлінська посада — BIM-менеджер, який відповідає за стратегічну координацію, налаштування процесів взаємодії, інтеграцію цифрових інструментів і контроль відповідності усіх етапів розробленому Плану виконання BIM (BIM Execution Plan). Такий менеджер виступає сполучною ланкою між керівництвом проєкту та його виконавцями,

забезпечуючи реалізацію принципів інформаційної сумісності, прозорості комунікацій і дотримання вимог замовника.

BIM-технологія, таким чином, виступає як методологічна основа для розробки та реалізації комплексної стратегії управління будівельним проектом. Вона охоплює основні етапи життєвого циклу споруди — від проектування та будівництва до експлуатації й демонтажу — і дозволяє створювати віртуальну модель об'єкта, в якій інтегруються усі технічні, економічні й часові параметри.

Основні завдання BIM-підходу полягають у:

- розробці цифрових стратегій управління проектом, які поєднують моделювання, аналіз і візуалізацію об'єкта;
- створенні єдиного інформаційного простору, де всі учасники мають доступ до актуальних даних, що усуває дублювання і втрату інформації;
- трансформації традиційної структури управління — від індивідуальних виконавців до скоординованих міждисциплінарних команд, які діють як єдиний інтелектуальний організм;
- підвищенні ефективності виконання робіт, скороченні витрат, оптимізації строків і зменшенні ризиків протягом усього життєвого циклу проекту.

BIM не лише оптимізує технічні процеси, а й змінює організаційну філософію сучасного будівництва, формуючи нову парадигму — інформаційно-кероване проектування, у якому цифрова модель стає основою взаєморозуміння між усіма учасниками, а ефективність досягається через інтеграцію знань, досвіду та технологій у межах спільного цифрового середовища.

2.2. Методичні підходи до ідентифікації та формалізації знань у BIM-середовищі

У процесі трансформації економіки та переходу до ринкових механізмів управління ключового значення набувають соціально-економічні взаємовідносини між учасниками господарської діяльності. Ефективність сучасного підприємництва визначається не лише рівнем матеріальних ресурсів або технологічних можливостей, а й якістю комунікацій, організаційною культурою та партнерською взаємодією між різними учасниками бізнес-середовища. У цьому контексті важливим фактором виступає поведінка суб'єктів господарювання на різних рівнях: між роботодавцями та працівниками, приватними компаніями та державними структурами, бізнесом і освітніми установами, промисловими підприємствами та науковими центрами.

Сучасна модель організації економічної діяльності дедалі більше спирається на принципи мережевого підходу, який упродовж останніх десятиліть активно застосовується в міжнародній практиці. Його сутність полягає у формуванні гнучких міжорганізаційних зв'язків, заснованих на взаємній вигоді, кооперації та спільному використанні ресурсів [221]. Такий підхід забезпечує швидку адаптацію до змін ринкових умов, сприяє ефективному обміну знаннями, а також підвищує рівень інноваційності в діяльності підприємств.

Будівельна галузь є однією з тих сфер, де мережевий підхід реалізується найбільш наочно. Будь-який інвестиційний проект у будівництві є комплексним

процесом, який передбачає координацію великої кількості організацій, що виконують різні функції на різних етапах життєвого циклу об'єкта. До таких учасників належать: державні регуляторні органи, інвестиційні фонди, девелоперські компанії, архітектурно-проектні бюро, інжинірингові структури, підрядні організації, постачальники будівельних матеріалів, виробники технологічного обладнання, науково-дослідні установи, консалтингові агентства, а також освітні й інформаційні інституції.

Координація їхньої діяльності вимагає налагодженої системи управління потоками інформації, фінансів і ресурсів. Проте традиційна ієрархічна структура управління часто виявляється неефективною, оскільки із збільшенням кількості учасників проекту зростає складність комунікацій, дублювання функцій і ризик управлінських помилок. Як наслідок — збільшуються терміни реалізації та витрати на координацію процесів [100].

Для мінімізації таких негативних ефектів сучасна практика будівництва переходить до використання інтегрованих моделей управління, які базуються на горизонтальній взаємодії між учасниками. У межах таких систем основна увага зосереджується на розподілі відповідальності, гнучкому управлінні інформаційними потоками та швидкому прийнятті рішень. Застосування цифрових інструментів, таких як BIM і системи управління проектами, дозволяє об'єднати всіх учасників у єдиний інформаційний простір, що забезпечує прозорість процесів, підвищує точність планування і сприяє раціональному використанню ресурсів.

Отже, перехід до мережевої моделі організації взаємодії у будівельних інвестиційних проектах є закономірною відповіддю на виклики сучасного ринку. Такий підхід створює передумови для формування синергетичних ефектів, де результат спільної діяльності перевищує суму індивідуальних внесків кожного з учасників, забезпечуючи вищу ефективність і стійкість функціонування галузі в цілому. Приклади перевищення інвестиційних бюджетів та термінів будівництва наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3.

Зростання фактичних витрат порівняно з кошторисом при будівництві значних об'єктів (розроблено автором на основі [100])

№	Назва об'єкта	Країна	Початкова кошторисна вартість, млн дол.	Фактична вартість після завершення, млн дол.	Відхилення, %	Основні причини перевищення кошторису
1	Сіднейський оперний театр	Австралія	7	102	+1357 %	Зміна проектних рішень, технічні складнощі, нестача досвіду з інноваційними матеріалами

2	Бостонський тунель «Big Dig»	США	2 800	14 600	+421%	Некоректні геологічні дані, зростання вартості матеріалів, проблеми з підрядниками
3	Аеропорт Берлін-Бранденбург	Німеччина	2 830	7 300	+158%	Помилки у плануванні, невідповідність технічних стандартів, управлінська неузгодженість
5	Міжнародний аеропорт Гонконг	Китай (Гонконг)	10 200	20 000	+96%	Ускладнення транспортної логістики, розширення функціональних зон
6	Гребля «Три ущелини»	Китай	25 000	32 000	+28%	Інфляційні коливання, додаткові технічні вимоги до безпеки
7	Міст «Міллау Віадук»	Франція	300	520	+73%	Інноваційні технології будівництва, зміна технічних вимог
8	Комплекс «Burj Khalifa»	ОАЕ (Дубай)	1 500	1 950	+30%	Зростання вартості сировини, модифікація архітектурного дизайну
9	Канал Панама (реконструкція)	Панама	5 250	7 600	+45%	Технічні складнощі, корекція технічних параметрів шлюзів
10	Міжнародний стадіон «Уемблі»	Велика Британія	600	1 570	+162%	Проблеми з підрядниками, затримки постачання матеріалів

У процесі реалізації масштабних будівельних проєктів часто спостерігається перевищення запланованих кошторисних витрат. Це зумовлено сукупністю технічних, організаційних та економічних факторів, що виникають на різних етапах життєвого циклу проєкту. Узагальнено основні причини цього явища наведено рисунка 2.4.

Формування мережевих організаційних структур у будівельній галузі розглядається як один із ключових чинників підвищення ефективності господарської діяльності. Така форма співпраці дозволяє суттєво зменшити трансакційні витрати, оптимізувати виробничі процеси й покращити координацію між усіма учасниками інвестиційно-будівельного циклу. Завдяки об'єднанню зусиль, ресурсів і компетенцій підприємства отримують можливість діяти більш узгоджено, що зменшує втрати часу на узгодження рішень, скорочує дублювання функцій та забезпечує швидше реагування на зміни ринкового середовища [204].

Мережевий підхід створює передумови для реалізації концепції партнерських відносин, яка ґрунтується на взаємній довірі, обміні знаннями та спільному прагненні до підвищення конкурентоспроможності. Його практична реалізація спирається на низку принципових положень, що визначають сучасну модель функціонування підприємств:

- орієнтація на досягнення спільних стратегічних цілей, таких як зростання конкурентних переваг, раціональне використання ресурсів і стабільне зміцнення ринкових позицій;
- потреба у взаємодії з державними інституціями для отримання підтримки у вигляді субсидій, податкових пільг або участі в державних програмах розвитку;
- необхідність залучення інвестицій, зокрема у сферу капітального будівництва, що потребує значних фінансових вкладень;
- стимулювання інноваційної активності підприємств, спрямованої на впровадження новітніх технологій і методів управління;
- розвиток цифрових комунікаційних систем, які забезпечують ефективний обмін даними в межах мережі;
- прагнення до досягнення синергетичного ефекту, коли спільна діяльність приносить більший результат, ніж сума окремих зусиль;
- запровадження методології бенчмаркінгу, що дозволяє переймати найкращі практики галузевих лідерів;
- формування нової корпоративної культури партнерства, орієнтованої на взаємну вигоду та стабільність співпраці.



Рис. 2.4. Зростання фактичних витрат порівняно з кошторисом при будівництві значних об'єктів (розроблено автором на основі [204])

Історично будівельна галузь протягом тривалого часу залишалася однією з найменш ефективних сфер економіки. Починаючи з 1960-х років і до початку XXI століття, продуктивність у будівництві демонструвала негативну динаміку. Зокрема, за даними досліджень, проведених у США, тоді як у промисловості загальний рівень продуктивності праці за півстоліття зріс удвічі, у будівельному секторі він, навпаки, скоротився приблизно на 20%. Це свідчить про глибоку структурну кризу галузі, спричинену фрагментованістю організацій, низьким рівнем координації та відсутністю ефективних комунікаційних механізмів.

Як видно на графіку (рис. 2.5), продуктивність у промисловому секторі демонструє стабільне зростання протягом усього періоду дослідження — з 100 % у 1964 р. до понад 210 % у 2003 р. Водночас у будівельному секторі спостерігається зворотна тенденція: індекс продуктивності знизився майже на 22 %, що свідчить про структурні проблеми, низький рівень автоматизації та слабку інтеграцію інновацій у виробничі процеси [8].

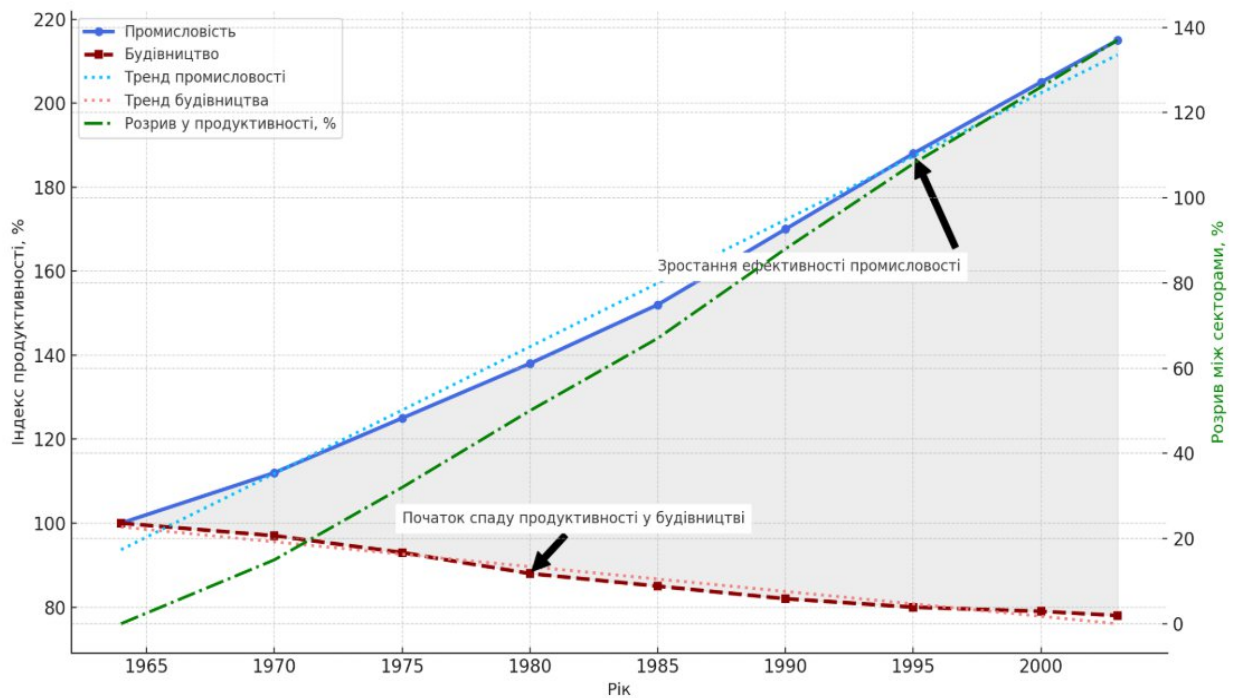


Рис. 2.5. Порівняльний аналіз рівня продуктивності у будівельному та промисловому секторах за період 1964–2003 років
(розроблено автором на основі [8])

Підвищення продуктивності у будівництві можливе лише за умови інтеграції підприємств у єдині мережеві структури, здатні до оперативного обміну інформацією, спільного управління ризиками та розподілу ресурсів. Для оцінки ефекту від такої інтеграції можна використати узагальнену формулу синергетичного ефекту:

$$S = \left(R_c - \sum_{i=1}^n R_i \right) + \left(E_c - \sum_{i=1}^n E_i \right), \quad (2.7)$$

де S — загальний синергетичний ефект від мережевої взаємодії, R_c — сукупний результат діяльності об'єднання, R_i — результати окремих учасників, E_c — сукупна ефективність мережі, E_i — індивідуальна ефективність підприємств до об'єднання.

Додатково рівень економії часу та ресурсів у межах мережевої структури може бути визначений через коефіцієнт інтеграційної узгодженості:

$$K_i = \frac{\Delta T + \Delta C}{T_0 + C_0}, \quad (2.8)$$

де K_i — інтегральний показник узгодженості, ΔT — скорочення тривалості виконання робіт, ΔC — економія витрат, T_0, C_0 — початкові параметри тривалості та вартості.

Розвиток мережових моделей взаємодії є важливим кроком до стабілізації й технологічного оновлення будівельної галузі. Впровадження таких підходів дозволяє створити умови для переходу від традиційних ієрархічних структур до гнучких, саморегульованих систем, орієнтованих на ефективність, інноваційність та сталий розвиток галузі [50].

Організаційна структура є фундаментальною складовою системи управління підприємством, оскільки вона визначає розподіл повноважень, відповідальності та комунікаційні зв'язки між усіма елементами організації. Саме через структуру відбувається координація діяльності, реалізація стратегічних цілей і підтримання функціональної цілісності підприємства. Ефективна організаційна структура не лише формує внутрішній порядок, але й виступає основою для гнучкого реагування на зміни зовнішнього середовища. Менеджмент отримує необхідні дані для прийняття рішень, а підрозділи – чіткі вказівки щодо їх виконання, що забезпечує стабільність управлінських процесів та їх ефективність.

Еволюція організаційних структур управління підприємствами відбувалася поступово — від елементарних, простих форм до складних, інтегрованих моделей. При цьому кожен наступний етап розвитку не заперечував попередній, а, навпаки, трансформував і вдосконалював його сильні сторони. Згідно з аналізом праць вітчизняних і зарубіжних науковців, сучасні підприємства застосовують широкий спектр структур: лінійну, лінійно-штабну, функціональну, дивізійну, матричну, проєктну, а також мережеву (у стабільній, динамічній або внутрішній формі) [33]. Усі вони можуть бути згруповані у три основні типи — вертикальні, горизонтальні та мережеві — залежно від принципу розподілу влади, обміну інформацією та рівня централізації.

Традиційні вертикальні структури з їх жорсткою ієрархією, централізованим прийняттям рішень і обмеженою комунікацією поступово втрачають актуальність. У сучасних умовах глобалізації та цифровізації підприємства дедалі частіше переходять до децентралізованих систем, у яких кожен учасник має рівноправний доступ до ресурсів, інформації та партнерів. Це дозволяє значно підвищити ефективність взаємодії, скоротити управлінські витрати й підвищити швидкість прийняття рішень. Основною одиницею такої організації стає «проєкт» — тимчасове об'єднання ресурсів і фахівців для досягнення певної мети. Проєктно-орієнтований підхід дедалі ширше застосовується не лише в будівництві, а й у наукових дослідженнях, маркетингових дослідженнях, консалтингу та ІТ-секторі.

В останні десятиліття науковий інтерес суттєво змістився у бік мережових моделей організації. Вони відображають тенденцію до гнучкості, відкритості та самоорганізації, що є особливо важливим для підприємств, які працюють у динамічному середовищі. Мережеві структури забезпечують взаємозалежність між учасниками, дозволяючи кожному з них одночасно зберігати автономність і користуватися перевагами спільної діяльності.

В останні десятиліття науковий інтерес суттєво змістився у бік мережових моделей організації. Вони відображають тенденцію до гнучкості, відкритості та самоорганізації, що є особливо важливим для підприємств, які працюють у динамічному середовищі. Мережеві структури забезпечують взаємозалежність між учасниками, дозволяючи кожному з них одночасно зберігати автономність і користуватися перевагами спільної діяльності [48].

Для наочного розуміння ключових відмінностей між основними типами організаційних структур управління підприємствами наведемо таблицю 2.4, у якій узагальнено їхні риси, сильні сторони та обмеження.

Таблиця 2.4.

Порівняльна характеристика типів організаційних структур управління
(розроблено автором на основі [48])

Тип структури	Основні характеристики	Переваги	Недоліки
Вертикальна	Централізована, багаторівнева, жорстка субординація	Контроль, чіткий розподіл обов'язків	Повільне ухвалення рішень, слабка гнучкість
Горизонтальна	Мінімальна кількість рівнів, децентралізація	Швидка комунікація, інноваційність	Обмежена керованість у великих системах
Мережева	Гнучка, динамічна, взаємопов'язана	Самоорганізація, синергія, швидка адаптація	Високі вимоги до координації та інформаційної інфраструктури

Мережеві структури стали логічним результатом еволюції управлінських систем, оскільки вони поєднують стабільність класичних ієрархій із динамічністю та гнучкістю горизонтальних моделей, що забезпечує підприємствам можливість функціонувати ефективно в умовах швидких технологічних і ринкових змін.

Узагальнюючи результати досліджень, можна зробити висновок, що ефективність тієї чи іншої організаційної моделі значною мірою залежить від внутрішньої узгодженості елементів системи управління, швидкості обміну інформацією та якості прийняття рішень. Для кількісної оцінки цих параметрів доцільно використовувати інтегральні показники ефективності організаційної структури, що подані у вигляді формул.

Перш за все, ефективність організаційної структури управління може бути описана через співвідношення результативності окремих підрозділів до сукупних витрат часу та ресурсів, що подано у наступній формулі:

$$E_{os} = \frac{\sum_{i=1}^n (K_{fi} \times R_i)}{C_{os} + T_{os}}, \quad (2.9)$$

де E_{os} — інтегральна ефективність організаційної структури, K_{fi} — коефіцієнт функціональної взаємодії підрозділів, R_i — результативність i -го підрозділу, C_{os} — сукупні витрати на управління, T_{os} — часові витрати на ухвалення рішень.

Наступним етапом аналізу є визначення оптимального рівня централізації управління, який характеризує баланс між контролем, швидкістю реакції системи та ступенем автономності її підрозділів. Цей показник може бути розрахований за наступною формулою:

$$C_{opt} = \frac{\alpha(S_d + I_e)}{R_m + \beta}, \quad (2.10)$$

де C_{opt} — оптимальний рівень централізації, S_d — ступінь диверсифікації діяльності, I_e — інтенсивність інформаційних потоків, R_m — рівень менеджерської компетенції, α, β — коефіцієнти узгодження параметрів управління.

Отримані залежності дозволяють здійснювати комплексну оцінку ефективності організаційних моделей та адаптувати структуру підприємства до умов високої динаміки ринку, забезпечуючи збалансованість між управлінською централізацією і гнучкістю системи.

Формування мережевої концепції в управлінні та організації виробництва стало результатом глибоких трансформацій економічних і соціальних процесів, що відбувалися під впливом розвитку інформаційних технологій, глобалізації ринків і динамічних змін у структурі світової економіки. Мережева модель господарювання виникла не спонтанно — вона стала логічним етапом еволюції управлінських систем, які прагнули підвищити ефективність взаємодії, адаптивність до ринку та здатність до швидкого обміну знаннями між суб'єктами господарювання.

У наукових підходах, присвячених дослідженню мережевих структур, виділяють кілька ключових концепцій, що заклали теоретичну основу їх розвитку.

1. Інформаційно-технологічна концепція розглядає мережеві організації як природне продовження процесу цифровізації виробництва. Вона базується на тому, що розвиток інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) створює передумови для інтеграції розподілених виробничих процесів у єдиний інформаційний простір, де обмін даними та координація дій відбуваються в реальному часі.

2. Інтеграційна концепція визначає мережеву взаємодію як етап подальшої еволюції коопераційних процесів. У її межах розглядаються такі форми співпраці, як стратегічні альянси, консорціуми, вертикальна інтеграція, аутсорсинг і спільне використання ресурсів, що дозволяють підприємствам концентруватися на своїх ключових компетенціях, передаючи інші функції партнерам.

3. Управлінська концепція трактує мережеву модель як новий етап автоматизації управлінських процесів, у якому цифрові технології забезпечують гнучкий контроль і управління потоками інформації, ресурсів і капіталу в межах децентралізованих структур.

На основі узагальнення наукових підходів можна виокремити ключові концепції, що сформуvalи теоретичне підґрунтя мережевої моделі організації діяльності, які відображено у рисунку 2.6.

Мережева структура виступає інноваційною моделлю перерозподілу інтелектуальних і матеріальних ресурсів між учасниками економічного процесу. Такий підхід дозволяє скорочувати витрати на адаптацію до ринкових змін, мінімізувати ризики та прискорювати впровадження інноваційних розробок. Для підприємств із обмеженими ресурсами, особливо у високотехнологічних галузях, мережевий принцип організації діяльності стає ключовим чинником конкурентоспроможності, оскільки забезпечує можливість об'єднання потенціалу кількох незалежних учасників у єдину інтегровану систему [33].

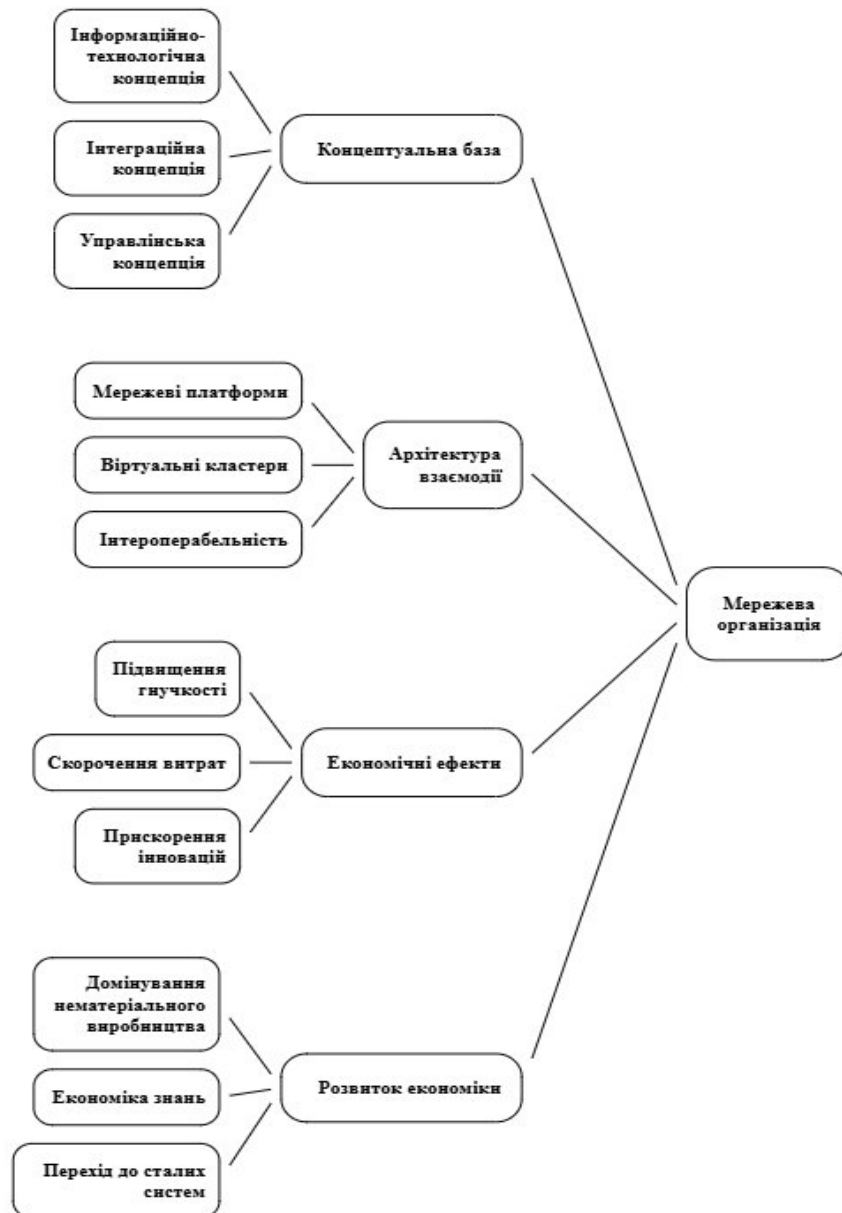


Рис. 2.6. Основні концептуальні підходи до формування мережевої моделі організації діяльності (розроблено автором на основі [33])

У сучасних умовах світова економіка зазнає глибокої структурної трансформації: відбувається поступовий перерозподіл матеріальних і інформаційних ресурсів від традиційного промислового виробництва до сектору послуг. Спочатку цей сектор виконував допоміжну функцію — підтримував виробництво та задовольняв потреби населення. З часом він перетворився на провідний напрям розвитку економік, у якому створюється переважна частка доданої вартості. При цьому послуги дедалі частіше набувають нематеріального характеру — йдеться про виробництво знань, інформації, технологій і цифрового контенту [210].

Розвинені економіки формують новий тип господарської системи — постіндустріальну, у межах якої провідну роль відіграє саме інформація, а головним ресурсом стає знання. Активна інформатизація управління, комп'ютеризація виробничих

процесів та глобальна інтеграція ринків створюють основу для формування мережевої економіки, яка поєднує в собі риси інноваційного, сервісного та когнітивного розвитку. Мережеві структури, своєю чергою, виступають не лише наслідком постіндустріальної трансформації, але й одним з її головних рушіїв, адже саме вони забезпечують ефективний обмін знаннями, координацію дій і швидке поширення технологічних інновацій у світовому масштабі.

Об'єднання підприємств у єдину мережеву систему ґрунтується на формуванні вертикальних і горизонтальних зв'язків між різними суб'єктами господарювання. Така взаємодія створює передумови для досягнення ефекту синергізму, коли спільна діяльність кількох учасників приносить значно більший результат, ніж сума окремих зусиль. Мережева модель дозволяє об'єднувати ресурси, компетенції та інформаційні потоки, що особливо важливо в умовах високої динаміки ринку та технологічної конкуренції. Для малих і середніх підприємств участь у мережевих структурах відкриває можливість поєднувати гнучкість і мобільність малого бізнесу з масштабністю, фінансовими ресурсами та інфраструктурними перевагами великих корпорацій.

У будівельній галузі такий формат взаємодії набув широкого поширення завдяки своїй здатності інтегрувати різні групи учасників інвестиційно-будівельного процесу. Перш за все, у ролі мережевих партнерів можуть виступати інвестори, замовники та забудовники. Їхня координація в межах спільного комунікаційного простору сприяє зміцненню ринкових позицій, полегшує залучення інвестицій, що має особливе значення для капіталомістких будівельних проєктів, і забезпечує сталу інформаційну взаємодію між усіма учасниками процесу. Спільна діяльність таких суб'єктів підвищує ефективність реалізації державних замовлень, розширює географію проєктів та дозволяє застосовувати інструменти публічно-приватного партнерства. Крім того, об'єднання зусиль створює сприятливі умови для лобіювання інтересів галузі на рівні державних органів управління.

Іншим варіантом є мережеві об'єднання будівельних підприємств одного профілю, які орієнтовані на координацію внутрішньогалузевої конкуренції. У такій взаємодії підприємства узгоджують цінову політику, встановлюють стандарти якості будівельної продукції, створюють спільні системи маркетингових комунікацій та реклами. Завдяки спільному використанню комерційних і технічних ресурсів вони знижують витрати, підвищують продуктивність праці та забезпечують узгодженість стратегічних рішень у межах ринку [151].

Третій тип мережевої взаємодії передбачає участь інноваційно орієнтованих організацій, які спеціалізуються на розробці, адаптації та впровадженні нових технологічних рішень. У цьому випадку будівельні компанії виступають носіями попиту на інновації, а науково-дослідні та інжинірингові підприємства — їх постачальниками. Таке партнерство стимулює технологічне оновлення галузі, сприяє впровадженню нових будівельних матеріалів, машин, механізмів і методів управління виробництвом [108]. У результаті формується цілісна екосистема інноваційного розвитку, у якій створюється позитивний ефект для всіх сторін — від виробників і замовників до кінцевих споживачів.

Узагальнені основні типи мережевих взаємозв'язків у будівельній галузі, їх ключові характеристики, переваги та можливі ризики наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5.

Типи мережевих взаємозв'язків у будівельній галузі та їх характеристика
(розроблено автором на основі [108])

Тип партнерства	Основні учасники	Характер взаємодії	Ключові переваги	Потенційні ризики
Вертикальне (інвестори – забудовники – замовники)	Інвестори, замовники, підрядники	Управління капітальними потоками та координація будівництва	Доступ до інвестицій, розширення ринку, підвищення довіри	Залежність від великих гравців, ризик втрати автономності
Горизонтальне (підприємства одного профілю)	Будівельні компанії одного типу	Узгодження цін, якості, рекламних кампаній	Зниження конкуренції, економія витрат, стабілізація ринку	Ризик картельних домовленостей, зниження гнучкості
Інноваційне (будівельні – наукові – технічні організації)	Інжинірингові, дослідні та проєктні установи	Адаптація і впровадження інновацій	Технологічний розвиток, зростання ефективності, впровадження BIM	Високі початкові витрати, ризик невдалого впровадження

Мережевий формат взаємодії у будівництві виступає дієвим інструментом підвищення конкурентоспроможності галузі, сприяючи створенню гнучкої системи партнерства, у якій інтегруються інтереси бізнесу, науки та держави. Така модель поєднує стратегічну стабільність із можливістю швидкого технологічного оновлення, забезпечуючи сталий розвиток будівельного сектору в умовах сучасної цифрової економіки.

Мережеві організаційні структури сьогодні виступають однією з найпрогресивніших форм організації бізнесу, яка поєднує гнучкість, адаптивність і високий рівень кооперації між учасниками. Її ефективність ґрунтується на синергетичному ефекті — коли результат спільної діяльності кількох підприємств перевищує суму їхніх індивідуальних досягнень. Це пояснюється тим, що в межах мережі ресурси, знання та інформація циркулюють швидше, а управлінські рішення приймаються на основі колективного досвіду й аналітичних даних. Завдяки цьому підприємства можуть мінімізувати витрати, підвищити якість управління й ефективніше використовувати наявний потенціал.

Однією з ключових переваг мережевої моделі є зменшення загальних витрат завдяки перетворенню зовнішніх витрат на внутрішні. Це досягається шляхом інтеграції процесів, об'єднання виробничих і логістичних ресурсів, а також спільного використання інформаційних систем. Учасники мережі отримують можливість доступу до великих інвестиційно-будівельних проєктів, нових ринків і джерел капіталу, що особливо важливо для малих і середніх підприємств. Вони можуть використовувати переваги великого бізнесу, зберігаючи при цьому гнучкість і незалежність власного управління.

Крім економічних вигод, мережеві структури сприяють швидкому навчанню та обміну знаннями між учасниками. Це створює основу для постійного вдосконалення компетенцій, стимулює впровадження інновацій і підвищує ефективність прийняття рішень. Завдяки інтеграції інформаційних потоків підвищується швидкість реалізації проєктів, зменшуються часові втрати та зростає якість кінцевого результату. Такі структури відзначаються високим рівнем організації комунікації, що дозволяє координувати дії у реальному часі та ефективно управляти складними міжорганізаційними процесами.

Водночас, як і будь-яка інша система, мережеві структури мають свої недоліки. Відсутність єдиного регуляторного центру може створювати проблеми з контролем і координацією, особливо у великих об'єднаннях із різномірним складом учасників. Складність забезпечення рівного доступу до інформації породжує ризик асиметрії, що може впливати на прийняття управлінських рішень. Висока залежність від кваліфікації персоналу, а також персоніфікований характер відповідальності підвищують рівень ризиків, пов'язаних із людським фактором.

Характерними рисами мережевих структур є горизонтальна інтеграція, гнучка форма взаємодії між організаціями, об'єднання їх навколо спільної мети та створення єдиного інформаційного простору. Кожна компанія в мережі зберігає юридичну самостійність, але діє в межах узгодженої стратегії, орієнтованої на досягнення спільного результату. Взаємовідносини між партнерами будуються як на основі офіційних угод і договорів, так і через неформальні канали комунікації, особисті контакти й довіру. Управління відбувається не через централізовану владу, а за рахунок координації та колективного прийняття рішень кількома лідерами, які забезпечують ефективну взаємодію між елементами структури.

У сучасних умовах головним ресурсом мережевої організації стає інтелектуальний капітал — знання, компетенції, креативність та інформація. Саме ці нематеріальні активи забезпечують здатність підприємств швидко адаптуватися до змін ринку, генерувати інновації та підтримувати високу конкурентоспроможність. Завдяки використанню інформаційних технологій створюється віртуальний простір, у якому відображається весь виробничий процес і до якого мають доступ усі учасники мережі. Така система перетворює традиційні підходи до управління на динамічну модель співпраці, що поєднує автономність, інтегрованість і стратегічну взаємозалежність.

2.3. Методи оцінювання ефективності впровадження BIM у проєктному управлінні

Оцінювання результативності впровадження технології інформаційного моделювання будівель (BIM) набуває особливого значення у процесі прийняття управлінських та інвестиційних рішень. Для цього найчастіше використовується показник окупності інвестицій (Return on Investment, ROI), який відображає співвідношення між отриманим прибутком і вартістю вкладень. Даний індикатор дозволяє зрозуміти, наскільки ефективним є використання фінансових ресурсів, спрямованих на впровадження BIM, а також прогнозувати очікувані вигоди для підприємства [240]

Застосування ROI у контексті інформаційного моделювання дає можливість оцінити економію матеріальних, фінансових і часових ресурсів, скорочення кількості проєктних помилок, оптимізацію комунікацій між учасниками процесу та підвищення точності планування. В результаті можна оцінити не лише прямі економічні результати, але й побічні ефекти, такі як покращення якості управлінських рішень, зниження ризиків і підвищення конкурентоспроможності організації.

Ряд досліджень показує, що рівень окупності інвестицій у BIM може бути надзвичайно високим — у деяких випадках ROI досягає 39 900 %. Проте достовірність таких значень залишається під сумнівом, адже часто автори не розкривають методологію розрахунків, вибірку проєктів чи умови експлуатації системи. У більшості робіт наведено лише кінцеві результати без деталізації способів збору, обробки та інтерпретації даних, що ускладнює порівняння різних результатів між собою [223].

У більш науково обґрунтованих працях здійснювався порівняльний аналіз груп проєктів — з використанням BIM і без нього. Так, середній рівень ROI для проєктів із впровадженням інформаційним моделюванням коливається у межах від 30 % до 400 %, залежно від складності будівельного об'єкта, етапу реалізації BIM-технологій і ступеня автоматизації процесів. Найбільш відчутний ефект спостерігається тоді, коли BIM інтегровано ще на етапі концептуального проєктування — це дозволяє своєчасно виявити колізії, узгодити технічні рішення й скоротити витрати на пізні етапи будівництва [278].

Слід зазначити, що розрахунок ROI для BIM має низку методичних труднощів. Зокрема, неможливо точно оцінити ефект від помилок, яких вдалося уникнути завдяки застосуванню BIM. Це пояснює, чому більшість досліджень мають форму case study, тобто аналізу одного або кількох конкретних проєктів, де впровадження інформаційного моделювання продемонструвало найкращі результати [306]. Також доведено, що BIM найбільш ефективний тоді, коли забезпечена тісна координація між усіма учасниками будівельного процесу — від проєктувальників до підрядників і експлуатаційних компаній [249].

Важливим чинником підвищення ROI є зменшення кількості проєктних помилок і неузгодженостей. Завдяки цифровій координації проєкту та використанню візуалізації у 3D і 4D форматах вдається уникнути дублювання завдань, неефективного використання матеріалів та затримок у графіку. Водночас BIM забезпечує ефективний моніторинг будівельних процесів і скорочує витрати на експлуатаційне обслуговування.

Для кращого розуміння економічної доцільності впровадження інформаційного моделювання будівель доцільно проаналізувати результати досліджень, у яких розраховано показник окупності інвестицій (ROI) при застосуванні технології BIM у різних типах проєктів. Узагальнені дані наведено у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6.

Результати досліджень ефективності впровадження BIM за показником ROI
(розроблено автором на основі [249])

Кількість аналізованих проєктів	Середній ROI, %	Основні фактори ефективності	Примітки
5	180	Оптимізація графіка робіт,	Високий ефект при ранньому

		усунення колізій	застосуванні BIM
8	350	Підвищення продуктивності, краща координація	Позитивна кореляція між рівнем BIM-зрілості і ROI
12	120	Зменшення витрат на матеріали	Дані базуються на порівнянні BIM і традиційних методів
4	310	Зниження ризиків і помилок у документації	Значна економія часу на узгодження
15	39 900	Повна цифровізація процесів	Ймовірна методологічна похибка через гіперболізацію ефектів

Таким чином, аналіз численних досліджень доводить, що використання BIM є не лише технологічною інновацією, а й вагомим економічним інструментом підвищення ефективності інвестицій у будівництві. Водночас необхідно вдосконалювати методики розрахунку ROI, щоб результати могли бути достовірними, порівнюваними та корисними для практичного застосування в управлінні будівельними проєктами.

У роботі розробили розширену модель оцінювання ефективності впровадження BIM, у якій враховуються як прямі, так і непрямі витрати, а також нематеріальні вигоди, що зазвичай залишаються поза межами традиційного фінансового аналізу. На основі аналізу 260 будівельних проєктів автори встановили, що витрати, пов'язані з переробкою, становлять у середньому 11,07 % від початкової вартості контракту, що істотно впливає на загальну економічну результативність. Дослідження також показало, що основними причинами змін у проєктній документації є помилки та невідповідності у контрактах, які могли бути усунені ще на стадії проєктування за умови використання BIM-технологій. Це доводить здатність інформаційного моделювання мінімізувати ризики неузгодженостей і підвищувати якість координації між усіма учасниками процесу [119].

McGraw-Hill також провели комплексне дослідження, присвячене аналізу впливу BIM на показник окупності інвестицій (ROI). Результати показали, що лише 21 % опитаних підприємств безпосередньо розраховують ROI, тоді як інші фокусуються на похідних показниках — зниженні трудовитрат, підвищенні продуктивності праці та скороченні строків реалізації робіт. Це пов'язано з тим, що багато ефектів від впровадження BIM мають непрямий характер: вони не завжди відображаються у фінансових звітах, але безпосередньо впливають на довгострокову рентабельність і стійкість підприємства.

Отримані результати свідчать про стійкий зв'язок між досвідом використання BIM і рівнем економічної ефективності компанії. Організації з більш тривалим періодом впровадження BIM демонструють вищі показники ROI, що пояснюється ефектом навчання та накопичення компетенцій. На початковій стадії впровадження будь-якої інноваційної технології, зокрема BIM, часто спостерігається тимчасове зниження ефективності через адаптаційні труднощі, падіння продуктивності та опір змінам. Після завершення фази адаптації ефективність поступово зростає і перевищує початковий рівень, формуючи стабільну тенденцію підвищення ROI [16].

Цей процес описується через функцію ефективності освоєння BIM-технологій, що враховує динаміку адаптації персоналу та організації:

$$E_{BIM}(t) = E_0(1 - e^{-kt}) + \Delta E, \quad (2.11)$$

де $E_{BIM}(t)$ — ефективність застосування BIM у часі, E_0 — базовий рівень ефективності до впровадження, k — коефіцієнт швидкості адаптації до цифрових інструментів, ΔE — приріст ефективності внаслідок повного освоєння технології.

Виявлена також закономірність експоненційного зростання ROI після періоду впровадження, що відображає відновлення та стабілізацію економічних показників організації. Це можна представити через функцію ROI з урахуванням інерційності процесів адаптації:

$$ROI(t) = ROI_{max} (1 - e^{-\alpha(t-t_0)}) , \quad (2.12)$$

Де $ROI(t)$ — поточне значення окупності інвестицій у момент часу t , ROI_{max} — граничний рівень ROI після повного впровадження, α — параметр темпу адаптації організації, t_0 — момент початку ефективного функціонування BIM.

Результати обох досліджень підтверджують, що економічний ефект від упровадження BIM не виникає миттєво, а формується поступово. Ефективність технології залежить від рівня зрілості організації, професійної підготовки персоналу та інтегрованості інформаційних процесів у межах життєвого циклу проекту. Довгострокове використання BIM призводить до зростання ROI, зниження кількості переробок, кращого управління ресурсами й підвищення стійкості підприємства до ринкових коливань.

У звіті Стенфордського Центру комплексної інженерної інфраструктури (CIFE) наведено узагальнені результати впровадження технології інформаційного моделювання в будівництві, отримані в ході дослідження 32 масштабних проєктів, де BIM був інтегрований на різних етапах життєвого циклу. Аналіз продемонстрував, що використання BIM дозволяє досягти значного скорочення витрат і часу, а також підвищення якості проєктних рішень [235]. Зокрема, було зафіксовано зниження кількості позабюджетних змін на 40 %, підвищення точності розрахунку вартості проєкту до межі 3 % (у порівнянні з традиційними 10 % без BIM), скорочення часу складання кошторисів на 80 %, а також економію близько 10 % від загальної вартості контракту за рахунок своєчасного усунення просторових колізій. Крім того, загальна тривалість реалізації будівельних проєктів скоротилася в середньому на 7 %, що свідчить про суттєве зростання продуктивності будівельно-інвестиційного процесу [120].

З огляду на такі результати, дедалі більшої актуальності набувають методи кількісного аналізу ефективності інвестицій у BIM. Одним із найвідоміших підходів є методика, розроблена Barlish і Sullivan, яка базується на аналізі показника RFI (Request For Information) — кількості запитів на уточнення або внесення змін до проєктної документації. Цей показник розглядається як індикатор якості та узгодженості інформації в процесі проєктування. У межах їх дослідження було проведено порівняльний аналіз чотирьох двовірних (2D) та чотирьох тривимірних (3D) проєктів, що належали до аналогічних функціональних категорій.

Отримані результати показали, що в середньому кількість запитів RFI у проєктах, реалізованих за допомогою BIM, була на 25–30 % меншою, ніж у традиційних 2D-проєктах. Крім того, зменшилася кількість змін у проєктах і скоротилися терміни їх реалізації. Це підтвердило ключову роль BIM як інструменту, що не лише візуалізує будівельний процес, а й інтегрує управління інформаційними потоками, знижуючи ризик виникнення колізій та дублювання даних [154].

Для наочності узагальнимо послідовність впливу BIM на ефективність будівельного проєкту у вигляді рисунка 2.7.



Рис. 2.7. Послідовність формування ефектів від упровадження BIM у будівництві (розроблено автором на основі [120])

Результати Barlish і Sullivan підтверджують, що інформаційне моделювання забезпечує прозорість управління проєктом, дає змогу оперативно виявляти проблеми на ранніх стадіях і запобігати повторним переробкам, які є основним джерелом перевитрат у будівництві. У поєднанні з даними CIFE можна стверджувати, що BIM не лише оптимізує роботу проєктних команд, а й стає стратегічним інструментом підвищення ефективності будівельних інвестицій на всіх рівнях — від планування до експлуатації об’єкта [25].

Для узагальнення результатів аналізу ефективності впровадження інформаційного моделювання наведено таблицю 2.7. Вона демонструє основні відмінності між традиційними підходами до проєктування та реалізацією проєктів із використанням BIM, що відображаються на рівні продуктивності, термінах виконання, кількості помилок та економічних показниках.

Отримані дані свідчать, що використання BIM у форматі 3D забезпечує не лише зниження кількості технічних помилок та прискорення проєктних процесів, але й створює умови для досягнення більшої фінансової віддачі від інвестицій. Застосування цифрових технологій у поєднанні з інтегрованим підходом до управління життєвим циклом об’єкта формує основу для підвищення прозорості, керованості та стійкості будівельних проєктів у сучасних умовах господарювання.

Таблиця 2.7.

Порівняльне дослідження результативності реалізації проєктів у форматах 2D та 3D (розроблено автором на основі [121])

Показник порівняння	Проекти у форматі 2D	Проекти у форматі 3D (BIM)	Відхилення / Ефект впровадження
Кількість RFI-запитів (на 1 проєкт)	120–150	80–100	Зменшення на 25–30 %
Кількість помилок у проєктній документації	Висока, понад 10 %	Низька, до 3 %	Підвищення точності до 70 %
Тривалість виконання проєкту	100 % (базове значення)	93 %	Скорочення терміну на 7 %
Точність кошторисних розрахунків	В межах ± 10 %	В межах ± 3 %	Підвищення точності на 7 %
Витрати на підготовку документації	100 %	20–30 %	Скорочення на 70–80 %
Рівень позабюджетних змін	До 15 %	До 9 %	Зменшення на 40 %
Економія від усунення колізій	Мінімальна	8–10 % вартості контракту	Позитивний ефект
Загальна рентабельність інвестицій (ROI)	Середня, 5–7 %	Висока, 12–15 %	Зростання у 2–3 рази

У практичній діяльності будівельних компаній необхідність у внесенні змін до проєктної документації виникає доволі часто, що обумовлено як уточненнями на етапі розробки технічних рішень, так і в процесі реалізації робіт. Це призводить до значних витрат часу, ресурсів і фінансів. Для оцінки масштабів цього впливу компанією J.C. Cannistraro було проведено ретроспективне дослідження 408 будівельних проєктів, реалізованих у період із 2003 по 2009 роки, із загальною вартістю понад 558,85 млн дол. США. Отримані результати переконливо продемонстрували, що активна співпраця між учасниками інвестиційно-будівельного процесу та використання BIM-технологій сприяють істотному зниженню витрат [181].

Зокрема, у традиційних 2D-проєктах частка витрат на внесення змін сягала 18,42 % від базової вартості контрактів. При використанні базового BIM-рівня, без глибокої інтеграції учасників, цей показник зменшувався до 11,17 %, а при реалізації інтегрованих BIM-проєктів із високим рівнем координації між замовником, проєктувальником і підрядниками — до 2,68 %.

Для аналітичного представлення впливу BIM на структуру витрат можна використати співвідношення, що відображає економічний ефект від впровадження інформаційного моделювання:

$$E_{BIM} = \frac{C_{2D} - C_{BIM}}{C_{2D}} \times 100\% , \quad (2.13)$$

де E_{BIM} — відносний ефект економії витрат, %, C_{2D} — середні витрати при використанні 2D-технологій, C_{BIM} — середні витрати при застосуванні BIM [52 Cannistraro, M. P. *Savings*].

Підставивши фактичні значення, отримаємо:

$$E_{BIM} = \frac{18,42 - 2,68}{18,42} \times 100\% = 85,44\%.$$

Отже, використання BIM забезпечує понад 85 % економії витрат, пов'язаних із внесенням змін, у порівнянні з традиційними методами.

Крім того, можна визначити інтегральний коефіцієнт ефективності впровадження BIM для сукупності проєктів:

$$K_{int} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad (2.14)$$

де E_i — економічний ефект для i -го проєкту, %, W_i — вартісна вага i -го проєкту в загальному портфелі, n — кількість проєктів, що аналізуються.

Отримане значення K_{int} дозволяє визначити усереднений ефект запровадження інформаційного моделювання на рівні підприємства чи організації.

Аналіз продемонстрував, що перехід від традиційних CAD-технологій до інтегрованого BIM не лише зменшує витрати, а й суттєво підвищує передбачуваність проєктних рішень, покращує координацію між учасниками будівництва та створює умови для більш гнучкого управління ресурсами. Це дозволяє скоротити кількість повторних робіт, зменшити ризики перевищення бюджету і термінів реалізації, а також забезпечити стабільне зростання загальної ефективності інвестиційних процесів у будівельній галузі [207].

Для наочного представлення взаємозв'язку між ступенем цифровізації процесів проєктування та обсягом витрат, пов'язаних із внесенням змін у будівельні проєкти, побудований рисунок 2.8, який демонструє динаміку впливу впровадження технології BIM на ефективність реалізації проєктів. На ньому відображено, як поступовий перехід від традиційного двовимірного проєктування (2D CAD) до базового, а потім до інтегрованого рівня BIM сприяє суттєвому зниженню витрат на коригування документації та одночасному зростанню економічного ефекту від цифрової інтеграції.

Сутність наступного підходу до оцінювання ефективності впровадження технології інформаційного моделювання полягає у порівнянні результатів реалізації будівельних проєктів-аналогів, що відрізняються лише рівнем використання BIM. Дослідники провели два експериментальні порівняння, метою яких було визначення впливу інформаційного моделювання на ключові показники продуктивності, економічності та управління будівельними процесами.

Кожне з порівнянь базувалося на двох реальних інвестиційно-будівельних проєктах, що мали подібні характеристики за масштабом, архітектурними параметрами, кошторисною вартістю та термінами реалізації. Один із них виконувався за традиційною методологією без використання цифрового моделювання (умовно позначений як проєкт А

— Pre-BIM), тоді як другий було реалізовано із застосуванням технології інформаційного моделювання (проект В — BIM-assisted). Такий підхід дозволив виключити вплив сторонніх факторів і сконцентрувати увагу на безпосередніх ефектах, зумовлених впровадженням BIM.

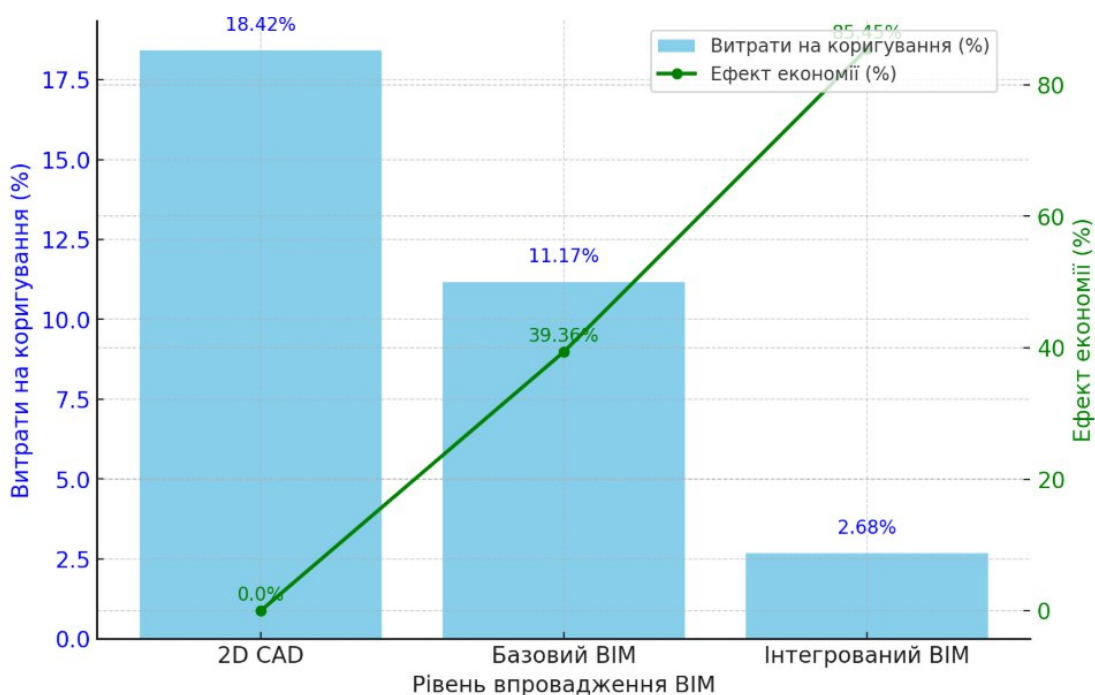


Рис. 2.8. Взаємозв'язок між обсягом витрат на коригування проєктів і ступенем впровадження технології BIM
(розроблено автором на основі [206])

Базою для аналізу виступали дані журналів RFI (Request For Information), що містили кількість запитів на зміни чи уточнення проєктних рішень, а також результати опитування генерального підрядника, який оцінював трудовитрати, координаційні проблеми та рівень узгодженості проєктної документації.

На другому етапі дослідження було проведено розрахунок показника рентабельності інвестицій (ROI) для кожного з порівнюваних об'єктів. Враховувалися як прямі, так і непрямі вигоди — економія часу, зниження вартості коригувань, уникнення колізій та зменшення ризиків перевищення бюджету. Отримані результати свідчать, що використання BIM дозволяє досягати більш високого рівня ефективності, стабільності графіка та прозорості процесів управління [72]

Для ілюстрації логіки порівняльного аналізу нижче подано рисунок 2.9, який відображає основні етапи оцінювання результативності впровадження BIM у практику будівельного проєктування.

Отримані результати показали, що впровадження BIM дало змогу скоротити кількість RFI-запитів приблизно на 30 %, зменшити середню тривалість будівельних робіт на 10–12 %, а також знизити загальні витрати на проєктування й координацію майже на 20 %. Проєкт В (BIM-assisted) продемонстрував не лише фінансові вигоди, але й якісні

переваги — зменшення кількості конфліктів між учасниками, поліпшення комунікації та підвищення прозорості процесу ухвалення рішень.



Рис. 2.9. Етапи порівняльного аналізу ефективності будівельних проєктів Pre-BIM та BIM-assisted (розроблено автором на основі [72])

Загалом, порівняльний аналіз підтвердив, що інформаційне моделювання є ключовим фактором підвищення ефективності управління інвестиційно-будівельними проєктами, створюючи умови для раціональнішого використання ресурсів, оптимізації часових і фінансових показників та формування єдиного цифрового середовища управління життєвим циклом споруди.

Подальший підхід до оцінювання рентабельності інвестицій (ROI) у впровадження інформаційного моделювання представлено в дослідженні Azhar. У цій роботі запропоновано метод, заснований на кількісному аналізі будівельних колізій, що виявляються за допомогою програмного комплексу Autodesk NavisWorks. Основна ідея

методу полягає у порівнянні кількості виявлених та усунутих невідповідностей між проектними рішеннями на етапі цифрового моделювання з фактичними витратами, яких вдалося уникнути на стадії будівництва [267].

У ході дослідження Azhar проаналізував десять великих проєктів, реалізованих компанією Holder Construction (США), де BIM застосовувався з різним ступенем глибини інтеграції — від часткового використання моделі для перевірки колізій до повного управління життєвим циклом об'єкта. Отримані результати виявили значну варіацію показника ROI — від 229 % до 39 900 %, що зумовлено різною структурою витрат і масштабом використання BIM у межах кожного проєкту.

Найвищі значення рентабельності спостерігалися в тих випадках, коли інформаційне моделювання було інтегровано вже на етапі планування та передпроектних робіт, що дало змогу попередити помилки, пов'язані з архітектурно-конструктивними неузгодженостями. У проєктах, де BIM почав використовуватися лише під час реалізації будівництва, ефект економії був менш вираженим, оскільки частина ресурсів уже була витрачена до моменту виявлення колізій.

Середній аналіз показав, що вартість впровадження BIM у розрахунку на загальний бюджет становила приблизно 0,06 % від вартості проєкту, тоді як економія коштів, досягнута за рахунок запобігання помилкам і дублюванню робіт, сягала 2,02 % від загальної вартості. Таким чином, навіть мінімальні інвестиції в інформаційне моделювання забезпечують багатократну окупність і підвищення загальної ефективності будівельного процесу.

Водночас, як зазначає автор, суттєвим обмеженням методу є те, що в розрахунок включалися лише прямі витрати — наприклад, вартість усунення колізій, переробок чи логістичних помилок. Непрямі витрати (пов'язані з адміністративними процесами, управлінням контрактами, змінами в графіку чи технічному нагляді) не враховувалися, хоча їхній вплив на загальний фінансовий результат може бути значним.

Якщо в модель розрахунку ROI додати непрямі витрати та наслідки їх уникнення, реальна економія від упровадження BIM буде ще вищою. Додаткові вигоди також спостерігаються в покращенні взаємодії між учасниками проєкту, підвищенні якості комунікацій, прозорості документообігу та скороченні часу на узгодження змін.

Для наочного відображення результатів дослідження Azhar було узагальнено дані щодо економічної ефективності впровадження BIM-технологій у десяти будівельних проєктах компанії Holder Construction. У таблиці 2.8 наведено ключові показники рентабельності інвестицій, що дозволяють оцінити вплив ступеня інтеграції BIM на фінансові результати реалізації проєктів.

Одним із сучасних підходів до оцінки ефективності впровадження технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) є модель PENG, що набула поширення у країнах Північної Європи. Цей метод ґрунтується на принципі вимірювання та аналізу економічних, організаційних і функціональних переваг, які отримуються внаслідок реалізації інноваційних технологій у будівельній діяльності. Назва PENG є шведською аббревіатурою від “Prioritering Efter Nyttö Grunder”, що перекладається як «визначення пріоритетів на основі вигід». Такий підхід орієнтований не лише на оцінку прямих фінансових показників, але й на визначення комплексного ефекту інновацій протягом усього життєвого циклу будівельного об'єкта.

На відміну від традиційних методів, модель PENG розглядає інвестиційний ефект не як одноразовий результат впровадження BIM на етапі проектування чи будівництва, а як довгострокову вигоду, яка розкривається протягом експлуатації споруди.

Таблиця 2.8.

Аналіз рентабельності інвестицій (ROI) у впровадження BIM-технологій на прикладі проєктів компанії Holder Construction *(розроблено автором на основі [295])*

№ проєкту	Загальна вартість проєкту, млн дол. США	Вартість впровадження BIM, % від вартості проєкту	Економія від застосування BIM, % від вартості проєкту	Розрахований ROI, %	Етап реалізації, на якому впроваджено BIM
1	42,5	0,05	2,3	4 500	Етап планування та проєктування
2	68,7	0,08	1,9	2 275	Етап будівництва
3	51,4	0,06	2,8	4 566	Етап проєктування
4	73,2	0,07	3,1	4 329	Повний життєвий цикл
5	90,6	0,05	1,6	3 100	Етап будівництва
6	37,8	0,04	2,0	4 900	Етап планування
7	82,1	0,06	3,4	5 566	Повний життєвий цикл
8	59,3	0,07	2,2	3 042	Етап проєктування
9	76,9	0,05	3,8	7 500	Етап планування
10	64,5	0,06	0,7	229	Етап будівництва

Автори методу виходять із того, що лише близько 5 % від загальних витрат припадає на етап проєктування і реалізації будівництва, тоді як решта 95 % витрат формується під час подальшої експлуатації, технічного обслуговування та утримання об'єкта. Тому оцінка ефекту від використання BIM має здійснюватися з урахуванням повного життєвого циклу будівлі — від початкового планування до її ліквідації чи реконструкції.

У межах методики використовується анкетування та інтерв'ювання учасників проєкту — архітекторів, інженерів, підрядників, замовників — з метою визначення рівня вигід, які вони отримують від використання BIM: зниження вартості робіт, підвищення

точності розрахунків, скорочення термінів виконання завдань, зменшення кількості помилок у документації та підвищення якості прийняття рішень.

Модель PENG складається з п'яти взаємопов'язаних блоків, що формують комплексну систему розрахунків [229]:

1. Загальна вартість будівництва, яка охоплює суму капітальних вкладень, витрат на проектування та розробку документації (без вартості землі та податків).
2. Розробка проєкту, де враховуються витрати на архітектурні та інженерні рішення, роботу консультантів з вентиляції, кондиціювання, електротехнічної частини, візуалізації, розрахунків і кількісного аналізу.
3. Дизайн і будівництво, що включає детальну структуру вартостей — роботу підрядників, закупівлю матеріалів, оплату праці, адміністративні витрати та логістичні операції.
4. Внесення змін у проєкт, що дозволяє врахувати додаткові витрати на коригування документації в процесі реалізації.
5. Зведена частина, у якій формується фінальний баланс вартостей і визначається сукупний ефект від впровадження BIM.

Перевагою підходу PENG є його системність і універсальність, адже він дозволяє оцінити як прямі економічні вигоди (зменшення витрат, підвищення продуктивності, скорочення термінів), так і непрямі ефекти, пов'язані зі зростанням рівня прозорості управління, поліпшенням взаємодії учасників і підвищенням інноваційного потенціалу компаній.

Таким чином, метод PENG виступає дієвим інструментом для обґрунтування доцільності інвестицій у BIM-технології, дозволяючи не лише кількісно оцінити ефективність, але й виявити пріоритетні напрями подальшого удосконалення будівельного процесу з урахуванням принципів сталого розвитку та оптимізації витрат у довгостроковій перспективі.

Фінансова модель оцінки рентабельності інвестицій у технологію інформаційного моделювання будівель (BIM) представлена в додатку Б і є узагальненим інструментом для аналізу економічної доцільності впровадження цифрових технологій у будівельні процеси. Її структура охоплює три ключові складові, що дозволяють комплексно розглянути фінансову ефективність BIM у контексті конкретного проєкту.

Перший компонент моделі — витрати на впровадження BIM, що включають закупівлю програмного забезпечення, придбання або модернізацію апаратних засобів, технічну підтримку, адаптацію існуючих бізнес-процесів, оплату навчання персоналу та залучення консультантів. У деяких випадках витрати також охоплюють перехідні процеси, пов'язані з уповільненням продуктивності на перших етапах інтеграції нової технології.

Другий компонент — економія від використання BIM, що розподіляється на пряму та непряму.

Пряма економія включає зниження витрат за рахунок скорочення кількості помилок у проєктній документації, усунення колізій, підвищення точності розрахунків і зменшення дублювання робіт. Непряма економія відображає фінансові вигоди, які виникають через скорочення тривалості реалізації проєкту, зменшення витрат на заробітну плату персоналу, оптимізацію логістики, зниження вартості фінансування

(зокрема відсотків за будівельними кредитами) та мінімізацію ризиків перевищення кошторису.

Третій елемент моделі — аналіз і розрахунок показника ROI, що передбачає визначення співвідношення отриманих вигід до витрат, понесених на впровадження BIM. Цей розрахунок дозволяє визначити, наскільки економічно виправданим є застосування інформаційного моделювання у кожному конкретному випадку.

Порівняльний аналіз існуючих методик показує, що модель PENG залишається однією з найбільш деталізованих і всеохопних. Вона враховує специфіку різних фаз реалізації проєкту, відображаючи вплив BIM на архітектурне, інженерне, фінансове та експлуатаційне управління. Значною перевагою цього підходу є можливість оцінки не лише фінансових показників, але й якісних результатів — підвищення прозорості комунікацій, зменшення кількості неузгодженостей, ефективніше управління інформаційними потоками.

Разом із тим модель PENG має певні обмеження. Її основний недолік полягає в тому, що вона не враховує вплив зміни тривалості будівництва (скорочення або подовження) на загальний економічний ефект, тобто не розглядає потенційні непрямі доходи або втрати, спричинені динамікою графіка реалізації проєкту. Крім того, використання експертних оцінок і опитувань респондентів може вплинути на надійність результатів, оскільки значна частина даних має суб'єктивний характер.

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що жодна з існуючих моделей не забезпечує абсолютно повної оцінки ефекту від впровадження BIM, однак кожна з них має власні переваги й може бути використана як окремий елемент інтегрованої системи фінансового аналізу.

Отже, при розрахунку ROI BIM ключовими змінними залишаються три параметри: витрати, вигоди та прибутковість, що утворюють основу фінансового балансу. Витрати включають усі інвестиційні та експлуатаційні компоненти, а вигоди охоплюють прямі й непрямі економічні ефекти, пов'язані зі скороченням термінів будівництва, зменшенням витрат, підвищенням точності планування та раціональнішим управлінням ресурсами у межах BIM-процесу.

Однією з головних проблем, що ускладнюють процес об'єктивної оцінки ефективності інвестицій у технології інформаційного моделювання будівель (BIM), залишається відсутність систематизованої бази даних про проєкти, реалізовані з використанням цих технологій. Така ситуація пояснюється кількома ключовими чинниками. По-перше, BIM як технологічна концепція є відносно новою для більшості національних будівельних ринків, тому статистичні дані щодо її практичного застосування ще не набули репрезентативного характеру. По-друге, учасники будівельних процесів часто не зацікавлені у створенні відкритої системи обліку витрат і доходів, оскільки це вимагає додаткових ресурсів, стандартизації даних та узгодження інформаційних потоків між підрядниками, замовниками й проектувальниками [102].

Додатковою складністю є відсутність єдиної методики оцінювання ефективності BIM, зокрема відсутність чіткого розуміння, які саме вигоди слід вважати економічно значущими та яким чином їх можна кількісно виміряти. Для побудови реалістичної та дієвої моделі аналізу ефективності впровадження BIM необхідно враховувати весь комплекс факторів, що впливають на результат — від технічних і організаційних до фінансово-економічних. Важливо, щоб оцінка охоплювала всі етапи життєвого циклу

будівельного об'єкта — від передпроектної підготовки до експлуатації та подальшої ліквідації споруди.

Варто зазначити, що ефект підвищення продуктивності найбільш відчутний для архітектурних і проектних бюро, тоді як підрядні організації, які переважно займаються виконанням робіт, отримують вигоду в інших аспектах — зокрема у сфері планування ресурсів, контролю витрат і взаємодії з постачальниками.

Питання скорочення тривалості будівельного процесу, хоча й часто наводиться як головна перевага BIM, потребує більш зваженого аналізу. На швидкість реалізації проекту впливає низка додаткових чинників: обрана модель управління, специфіка конструкцій, технологічний рівень використовуваного обладнання, організація праці та якість менеджменту. Без урахування цих факторів складно ізолювати реальний вплив BIM на часові показники, що знижує точність оцінки ROI.

У цьому контексті доцільно представити таблицю 2.9, яка відображає основні ключові фактори впливу BIM на економічну ефективність будівельного проекту, згруповані за типами вигод.

Таблиця 2.9.

Ключові показники впливу BIM на ефективність реалізації будівельних проектів
(розроблено автором на основі [102])

№	Показник	Тип впливу	Основний ефект	Зацікавлені сторони
1	Підвищення продуктивності проектування	Пряма вигода	Скорочення термінів розробки документації, зниження витрат на переробку	Архітектори, проектувальники
2	Зменшення кількості змін у проекті (RFI)	Пряма вигода	Зниження помилок і витрат на узгодження	Підрядники, замовники
3	Скорочення тривалості будівництва	Непряма вигода	Оптимізація графіка, підвищення оборотності капіталу	Девелопери, інвестори
4	Зниження адміністративних витрат	Непряма вигода	Економія ресурсів на управління документацією	Менеджери проектів
5	Підвищення точності кошторисів	Пряма вигода	Зменшення ризику перевищення бюджету	Замовники, підрядники

На основі узагальнення існуючих методів аналізу можна виділити ключові показники, які формують дохідну частину розрахунку економічного ефекту від застосування BIM. До них належать:

- Підвищення продуктивності розробки проектної документації — скорочення часу підготовки креслень, візуалізацій та розрахункових моделей, зменшення кількості помилок і неузгодженостей між дисциплінами.
- Скорочення термінів реалізації проекту, що забезпечується за рахунок кращої координації учасників, паралельного виконання завдань і швидшого ухвалення рішень.

- Зменшення кількості змін у проєктній документації — показник, який безпосередньо впливає на зниження непродуктивних витрат і ризику зриву термінів.

Одним із важливих індикаторів ефективності застосування технології інформаційного моделювання будівель (BIM) є кількість запитів на внесення змін до проєкту (RFI — Request for Information). Цей показник широко використовується в будівельній практиці як критерій, що дозволяє оцінити рівень точності, узгодженості та якості проєктної документації. Загальне припущення полягає в тому, що використання BIM сприяє зменшенню кількості RFI, оскільки цифрова модель забезпечує більш повне, достовірне та структуроване подання інформації. У результаті проєктна команда отримує можливість на ранніх етапах виявляти невідповідності між різними частинами проєкту, що значно знижує ризики неузгодженостей під час будівництва.

Водночас прямий зв'язок між використанням BIM і кількістю RFI не завжди має однозначний характер. На цей показник впливає ціла низка зовнішніх та внутрішніх чинників, серед яких — складність проєкту, його технічна унікальність, рівень взаємодії учасників та організаційна культура компанії. Наприклад, проєкти, що реалізуються у прискореному форматі (fast-track construction), часто супроводжуються частими змінами дизайну, навіть при використанні BIM. Подібна ситуація характерна і для об'єктів з високим рівнем інженерної складності або нестандартними архітектурними рішеннями.

Ще один фактор, що впливає на кількість запитів RFI, — якість комунікації в команді. Якщо обмін інформацією між підрядниками, проєктувальниками та замовниками є неефективним або відбувається переважно в неформальній формі (вербально, без офіційної фіксації документів), кількість офіційно зареєстрованих запитів може бути нижчою, але це не завжди свідчить про реальне підвищення якості проєктної документації. У таких випадках зменшення RFI може бути статистичною ілюзією, а не результатом ефективності BIM.

З огляду на це, більш обґрунтованим підходом є безпосередній аналіз кількості помилок у проєктній документації, а не лише кількості запитів на зміни. Для цього варто розділяти помилки на дві категорії [127]:

1. Помилки, які можуть бути виявлені без застосування BIM, тобто ті, що піддаються перевірці традиційними інженерними методами (наприклад, через досвід фахівців або детальний аудит креслень).
2. Помилки, виявлення яких можливе лише за допомогою BIM, коли технологія дозволяє виявити конфлікти між системами (колізії), невідповідності геометрії чи просторових рішень, що не завжди очевидні на двовимірних кресленнях.

Деякі фахівці у сфері проєктування зазначають, що досвідчені інженери-конструктори здатні і без використання BIM ідентифікувати більшість критичних помилок ще на етапі проєктування або безпосередньо під час будівництва. Проте BIM забезпечує системність і швидкість такого аналізу, усуваючи людський фактор та автоматизуючи процес перевірки колізій.

Важливо враховувати, що не всі помилки мають однаковий економічний ефект. Деякі з них, хоч і часто виявляються завдяки BIM, не мають суттєвого впливу на загальну вартість або терміни реалізації проєкту. Саме тому у подальших дослідженнях доцільно здійснювати не лише кількісний, а й якісний аналіз помилок, визначаючи, які з них мають найбільше значення для фінансового результату та ефективності будівництва.

Отже, оцінка результативності BIM на основі показника RFI повинна проводитися в контексті багатофакторного аналізу, який враховує структуру комунікацій, специфіку об'єкта, рівень інтеграції учасників та економічну значущість виявлених помилок, що забезпечить реальну, а не формальну оцінку ефекту від впровадження інформаційного моделювання.

2.4. Моделі дослідження мережевих структур і потоків знань у когнітивному середовищі проекту

Управління складними проєктами у галузях будівництва, енергетики, транспорту чи промисловості відбувається в умовах інтенсивного інформаційного обміну між численними учасниками. Кожен із них є не лише виконавцем окремих функцій, а й носієм знань, які утворюють багаторівневу динамічну мережу взаємодії. Ефективність управління безпосередньо залежить від того, наскільки швидко, точно й цілеспрямовано передаються, накопичуються та трансформуються ці знання між елементами проєктного середовища.

У когнітивній системі проєкту знання виступають не статичними об'єктами, а активними потоками, що циркулюють між людьми, цифровими платформами, моделями та аналітичними механізмами. Ця взаємодія формує динамічний інформаційний простір, який розвивається, навчається і здатний самостійно генерувати нові компетенції. Саме тому однією з ключових проблем у сфері управління проєктами є побудова моделей, які відображають структуру, напрямки та інтенсивність потоків знань у межах організаційно-технологічного середовища.

Поняття мережевої структури знань поєднує інформаційний та соціальний виміри. З одного боку, це система взаємопов'язаних даних, моделей і алгоритмів, що функціонують у цифровому середовищі — наприклад, у BIM, PLM або ERP-платформах. З іншого боку, це мережа людських взаємодій — комунікації між фахівцями, управлінцями, аналітиками, інженерами та експертами, які разом створюють нові знання на основі обміну досвідом і результатами діяльності. Взаємодія цих двох рівнів — технічного та когнітивного — формує інтелектуальний простір, у якому потоки знань є рушійним чинником розвитку проєкту.

Моделі мережевих структур знань розглядають проєкт як відкриту адаптивну систему, у якій кожен вузол (учасник, технологічний модуль або джерело даних) взаємодіє з іншими через інформаційні зв'язки. Потоки знань, що проходять цими зв'язками, формують комунікаційні траєкторії, уздовж яких інформація перетворюється на аналітичні висновки, управлінські рішення й нові знання.

Вивчення таких мереж дозволяє:

- визначати центри компетенцій — ключові вузли, де зосереджено найбільший інтелектуальний потенціал;
- оцінювати ефективність і швидкість передачі знань між підрозділами чи командами;
- виявляти слабкі або перевантажені комунікаційні канали, де відбувається спотворення інформації;
- оптимізувати маршрути руху знань, забезпечуючи точність і релевантність інформаційних потоків.

Важливою властивістю таких систем є їх еволюційний характер. У процесі накопичення досвіду структура зв'язків змінюється: одні комунікаційні вузли посилюються, інші зникають, а нові зв'язки виникають у відповідь на зміни в середовищі проєкту. Це робить когнітивне середовище не лише інтерактивним, а й самонавчальним — воно здатне оновлювати власну архітектуру знань у відповідь на нові виклики.

Для аналізу подібних структур використовують моделі мережевого аналізу, що базуються на теорії графів і принципах комплексних систем. У цих моделях вузли відповідають суб'єктам або джерелам знань, а зв'язки — інформаційним взаємодіям між ними. Застосування метрик, таких як центральність, щільність, кластерність чи когезія, дозволяє визначити вплив окремих учасників на загальну ефективність обміну знаннями, а також оцінити стійкість системи до інформаційних збоїв.

В умовах багаторівневої координації та географічної розподіленості команд мережеве моделювання стає інструментом когнітивного управління, що поєднує аналітичну та візуальну складові. Воно допомагає бачити не лише потоки документів або даних, а й реальні траєкторії руху знань між людьми, технологіями й платформами. Такий підхід відкриває можливість аналізувати комунікаційні структури, прогнозувати наслідки зміни інформаційних маршрутів і підвищувати гнучкість системи управління [234].

Узагальнену схему функціонування когнітивної мережі знань у межах проєкту наведено на рисунку 2.10. Вона ілюструє, що ефективність проєктного середовища визначається не обсягом інформації, а якістю зв'язків між учасниками та швидкістю перетворення даних у знання, які здатні впливати на управлінські рішення.

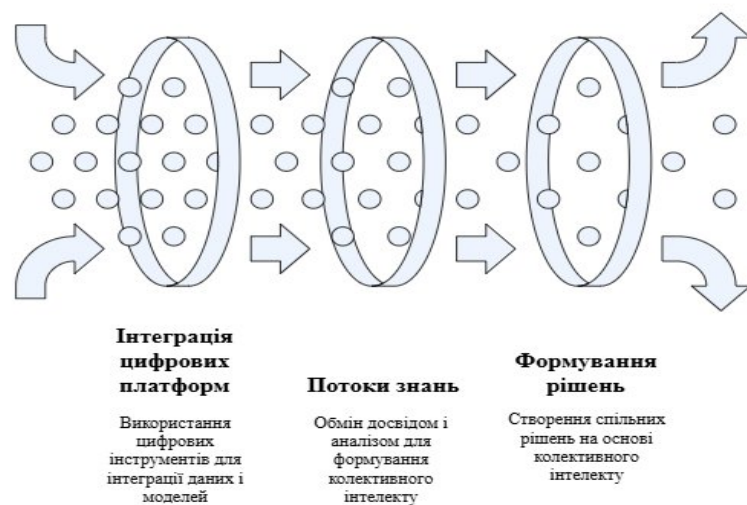


Рис. 2.10. Узагальнена модель мережевої структури та потоків знань у когнітивному середовищі проєкту (розроблено автором на основі [234])

Мережеві моделі когнітивного середовища дозволяють не лише досліджувати структуру комунікацій, а й перетворювати її на активний механізм самонавчання та розвитку. Завдяки цим моделям проєкт набуває властивостей інтелектуальної системи — такої, що здатна адаптуватися до змін, обмінюватися знаннями в реальному часі й створювати нові рішення шляхом колективного мислення. Це формує підґрунтя для побудови гнучких мережевих структур управління знаннями, які стають основою когнітивного управління в цифровій економіці.

Дослідження взаємозв'язків між архітектурою мережевої структури управління та результативністю діяльності проекту є складним і багатовимірним завданням. Найбільшою проблемою при цьому є формалізація зв'язків між учасниками когнітивної мережі, оскільки кожен з них одночасно виконує функцію генератора, споживача та передавача знань. Через цю багатозв'язність система набуває властивостей нелінійності, що ускладнює опис її поведінки за допомогою традиційних організаційних критеріїв. Тому оцінювання ефективності мережевої структури у практиці управління зазвичай ґрунтується на непрямих показниках: кількості рівнів взаємодії, щільності комунікацій, швидкості обміну даними, обсязі витрат на підтримку інформаційного зв'язку або рівні централізації управлінських процесів [166].

У межах когнітивного середовища проекту така оцінка вимагає більш гнучких підходів, які враховують не лише організаційну ієрархію, а й інформаційні потоки між вузлами мережі. Саме тому для аналізу ефективності взаємодії дедалі частіше застосовується математичний апарат, що дозволяє формалізувати залежності між структурними характеристиками мережі та її здатністю до обміну знаннями. Умовно такі моделі поділяють на дві категорії: результативні, у яких ефективність безпосередньо пов'язується з кінцевими показниками діяльності системи, та оціночні, що базуються на непрямих параметрах — щільності комунікацій, когерентності інформаційних зв'язків, часі передачі даних тощо [117].

Загальний рівень ефективності когнітивно-мережевої структури можна описати через інтегральну функцію залежності від низки параметрів:

$$E = f(C, D, T, R, K), \quad (2.15)$$

де E — інтегральний показник ефективності мережі; C — коефіцієнт зв'язності, що характеризує ступінь інтегрованості вузлів; D — середня довжина інформаційного шляху між учасниками; T — час передачі знань; R — рівень надмірності комунікацій; K — коефіцієнт когнітивної узгодженості, який відображає ступінь спільного розуміння інформації. Максимізація цього показника забезпечує оптимальний баланс між швидкістю обміну знаннями, рівнем інформаційної повноти та когерентністю дій у межах проекту.

З точки зору інформаційного аналізу, продуктивність когнітивної системи може бути виражена через співвідношення корисного знання, отриманого на виході, до сукупних ресурсів, витрачених на його формування:

$$P_i = \frac{I_{out}}{I_{in} + R_s}, \quad (2.16)$$

де P_i — інформаційна продуктивність системи; I_{out} — обсяг знань, що трансформуються у корисну інформацію; I_{in} — сукупний обсяг вхідних даних; R_s — ресурси, витрачені на підтримку комунікацій, зокрема час, фінансові витрати чи енергетичні ресурси. Чим ближче значення P_i до одиниці, тим ефективніше функціонує когнітивна мережа, мінімізуючи інформаційні втрати.

Ще одним аспектом оцінки є структурна збалансованість системи, яку можна описати рівнянням когнітивно-мережевого балансу:

$$S = \alpha \cdot C - \beta \cdot L, \quad (2.17)$$

де S — інтегральний показник структурної оптимальності; C — щільність комунікацій між учасниками; L — середня кількість інформаційних рівнів або затримок у передачі даних; α і β — вагові коефіцієнти, що визначають важливість швидкості обміну та стабільності структури відповідно. Зростання показника S вказує на оптимізацію мережевої взаємодії та скорочення зайвих комунікаційних бар'єрів [75].

Для систем когнітивного типу важливим критерієм є також здатність до формування синергетичного ефекту — тобто до створення нового знання в результаті колективної діяльності. Це явище можна виразити через коефіцієнт когнітивної синергії:

$$S_c = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i + \Delta K_i)}{n}, \quad (2.18)$$

де S_c — показник синергії; E_i — ефективність обміну знаннями між i -м учасником і мережею; ΔK_i — приріст індивідуальних знань у процесі колективної роботи; n — кількість активних вузлів системи. Якщо значення S_c перевищує одиницю, це свідчить про виникнення ефекту колективного інтелекту, коли спільна діяльність дає вищий результат, ніж сума індивідуальних дій окремих учасників.

Таким чином, запропоновані залежності дозволяють комплексно оцінити ефективність когнітивно-мережевих структур у проєктному середовищі, враховуючи не лише організаційні характеристики, а й динаміку обміну знаннями, швидкість інформаційних потоків, ступінь взаємної узгодженості та здатність системи до самонавчання. Математичні моделі цього типу виступають основою для побудови адаптивних алгоритмів управління, у яких мережа не є жорстко визначеною структурою, а змінюється в режимі реального часу у відповідь на трансформації проєктного середовища.

Узагальнено можна стверджувати, що ефективність когнітивної мережі визначається не кількістю інформаційних каналів і не глибиною ієрархії, а якістю взаємодії, здатністю системи зберігати узгодженість при високій інтенсивності обміну та рівнем синергетичної взаємодії учасників. Саме ці показники стають ключовими критеріями при розробленні сучасних моделей управління знаннями в цифрових і когнітивних проєктних середовищах [175].

Підвищення рівня конкурентності, ускладнення умов господарювання та зростання динаміки змін середовища змушують підприємства ретельно аналізувати ефективність власних організаційних і когнітивно-мережевих структур. У цих умовах управлінська архітектура стає не просто засобом координації дій, а ключовим чинником адаптивності системи до зовнішніх викликів. Вибір оптимальної форми організації залежить від поєднання багатьох факторів — технологічних, економічних, інформаційних та поведінкових. Саме тому визначення найефективнішої структури для конкретних умов проєкту вимагає застосування різних наукових підходів, серед яких центральне місце посідають мережеві моделі управління знаннями [173].

Універсальні теорії організаційного розвитку підкреслюють, що ефективна структура не може бути сталою — вона змінюється залежно від цілей, масштабів діяльності, зовнішнього середовища та ступеня інтеграції учасників у єдину систему. Відмінності між організаційними моделями найчастіше проявляються у рівні спеціалізації функцій, глибині формалізації управлінських процедур і балансі між централізацією та децентралізацією процесів прийняття рішень. У контексті когнітивного управління важливо враховувати, що структура мережі знань визначає не лише розподіл ролей, а й швидкість циркуляції інформації та здатність системи до самоорганізації.

Для кращого розуміння механізмів функціонування таких систем доцільно звернутися до соціальних основ мережевого підходу, що сформувалися у межах соціології знань та теорії комунікацій. Початок науковому осмисленню мережевих взаємодій поклали праці класиків соціології XX століття, зокрема дослідження Джейкоба Морено, який у 1930-х роках розробив метод соціограми — графічного представлення взаємозв'язків між людьми у групах. Саме ця ідея стала базою для виникнення методу аналізу соціальних мереж (Social Network Analysis, SNA), який нині широко застосовується в управлінні проектами, організаційній поведінці та комунікаційних системах [262].

Упродовж 1940–1960-х років відбувалася еволюція структурних підходів до вивчення соціальних систем: учасники мережі почали розглядатися як елементи комунікаційних структур, взаємодія яких може бути описана математично за допомогою матричної алгебри та теорії графів. Це дозволило дослідникам перейти від якісного опису зв'язків до кількісного вимірювання показників щільності, центральності, когезії та інформаційної взаємозалежності.

Ідея SNA знайшла своє відображення і в сучасному підході до когнітивного управління в проектному середовищі, де потоки знань функціонують подібно до соціальних зв'язків. Учасники проекту формують взаємопов'язану мережу обміну інформацією, у якій знання передаються, адаптуються, накопичуються і синтезуються у процесі колективної діяльності. Аналіз таких зв'язків дозволяє виявити вузли високої активності (центри компетенцій), критичні комунікаційні ланцюги, а також зони інформаційних втрат, що знижують ефективність управління.

У загальному вигляді механізм функціонування когнітивно-мережевої структури можна подати у вигляді блок-схеми (рис. 2.11), яка демонструє, як інформація циркулює між учасниками, утворюючи замкнені петлі зворотного зв'язку, необхідні для підтримки колективного інтелекту системи.

Методологія аналізу соціальних і когнітивних мереж дозволяє перейти від інтуїтивного розуміння комунікацій до кількісного вимірювання ефективності обміну знаннями. Застосування принципів SNA у проектному управлінні створює підґрунтя для побудови моделей, здатних відображати не лише статичну структуру взаємодій, а й динаміку формування спільного знання, що є фундаментом для розвитку когнітивних систем нового покоління [5].

Методологія аналізу соціальних мереж (Social Network Analysis, SNA) відкриває нові підходи до вивчення інформаційних взаємозв'язків і механізмів обміну знаннями у складних системах. Вона дозволяє не лише ідентифікувати ключових учасників комунікаційного процесу, а й визначити ті ділянки мережі, де відбуваються затримки інформаційних потоків, дублювання чи спотворення даних. У межах когнітивного управління проектами SNA

виступає інструментом діагностики ефективності потоків знань, допомагаючи оцінити реальну динаміку взаємодії між усіма учасниками мережі [106].

Parise наводить переконливий приклад того, як застосування SNA може слугувати засобом виявлення комунікаційних вузьких місць у процесі прийняття управлінських рішень. За допомогою аналізу інформаційних зв'язків можливо встановити, які саме комунікаційні канали перевантажені або малоефективні, а також визначити оптимальні шляхи поширення знань між підрозділами. У контексті когнітивного середовища це має вирішальне значення, оскільки швидкість і точність обміну інформацією прямо впливають на якість прогнозування, планування й контролю проекту.

Schultz-Jones у своїх дослідженнях розглядає роль слабких зв'язків як критичного чинника сталості мережевої структури. Вона доводить, що ефективність обміну інформацією залежить не лише від кількості контактів, а й від таких параметрів, як частота взаємодії, рівень взаємності та міра довіри між учасниками. Саме слабкі, проте численні зв'язки формують середовище, у якому інформація вільно поширюється за межі окремих груп, стимулюючи виникнення нових ідей і забезпечуючи інноваційність системи [226]. Для будівельного проекту це означає, що відкритість комунікацій і підтримка міждисциплінарних контактів сприяють появі нових управлінських рішень і підвищують адаптивність організації.

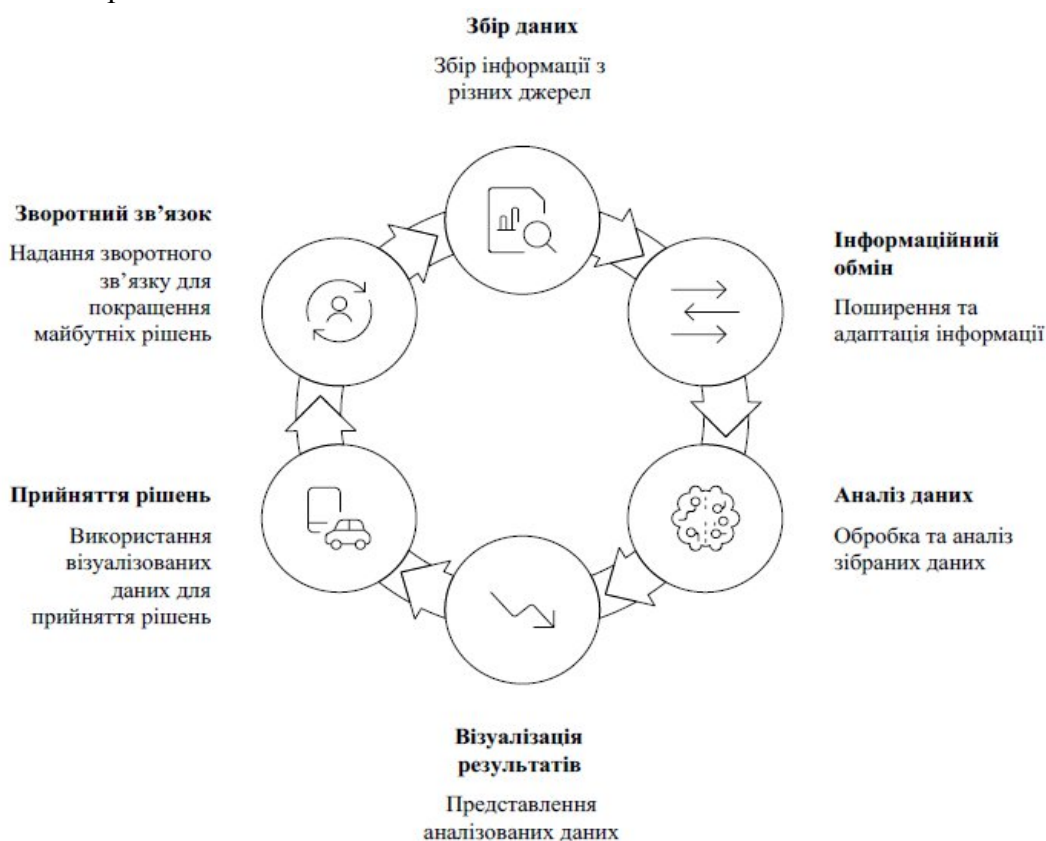


Рис. 2.11 Базова модель аналізу мережевих зв'язків у когнітивному середовищі проекту (адаптовано автором на основі [106])

У працях Moliterno і Mahony підкреслюється, що організаційні мережі є багаторівневими системами, у яких взаємодія відбувається одночасно на кількох площинах — індивідуальній, груповій, корпоративній та міжорганізаційній. Відповідно,

інформаційні потоки не обмежуються внутрішніми комунікаціями однієї компанії, а циркулюють між усіма учасниками ланцюга створення вартості. У будівельних проєктах це особливо очевидно: підрядники, інжинірингові компанії, консультанти, замовники та цифрові платформи взаємодіють у єдиному когнітивному полі, формуючи мережу знань із динамічними горизонтальними і вертикальними зв'язками [189].

Aggarwal розглядає SNA як модель структури взаємодій, де актори (вузли) і зв'язки між ними формують адаптивну систему, здатну еволюціонувати під впливом зовнішніх та внутрішніх чинників. Учений підкреслює, що подібні мережі виникають у різних контекстах — від академічних колаборацій до промислових альянсів — і завжди відображають рівень зрілості спільноти в управлінні знаннями. У цьому сенсі когнітивна мережа проєкту є відображенням ступеня кооперації між усіма учасниками, а не лише технічної інтеграції [176].

На думку Butts, SNA варто розглядати як міждисциплінарну дослідницьку парадигму, спрямовану на передбачення того, як зміна структури зв'язків впливає на поведінку системи. Зміна щільності мережі, перерозподіл ролей або зміна центральності окремих вузлів може суттєво змінити динаміку прийняття рішень. Таким чином, SNA не лише описує поточний стан комунікацій, а й дозволяє моделювати сценарії розвитку системи у відповідь на зовнішні впливи [50, 138].

Mauey доповнює цей підхід, зазначаючи, що аналіз соціальних мереж використовує поєднання кількісних і якісних методів. Поряд із числовими метриками (центральність, когезія, кластеризація) SNA активно застосовує дискурсивний аналіз і візуальні інструменти, які дозволяють дослідити структуру не лише математично, а й семантично. Завдяки цьому стає можливим комплексне розуміння мережі як когнітивного простору, у якому знання циркулюють, змінюються та набувають нових форм [187].

Узагальнюючи, можна стверджувати, що методологія SNA є ключовим аналітичним інструментом для дослідження потоків знань у когнітивному середовищі проєкту. Вона дає змогу виявляти сильні та слабкі сторони комунікацій, визначати рівень інформаційної інтегрованості системи, прогнозувати вплив структурних змін на ефективність управління та забезпечувати узгодженість дій усіх учасників проєкту. SNA перетворює опис соціальної структури на аналітичну модель інтелектуальної взаємодії, що відображає реальну логіку обміну знаннями в умовах цифрової трансформації.

Поширення мережевого підходу як форми організації управління та господарської діяльності стало одним із ключових результатів технологічної та комунікаційної революції другої половини XX століття. Його виникнення пов'язують із 1960-ми роками — періодом активної індустріалізації, автоматизації виробництва та становлення глобалізаційних процесів. У цей час підприємства економічно розвинених країн почали об'єднуватися у виробничі та інформаційні альянси, що дозволило їм підвищити ефективність, скоротити транзакційні витрати й оперативніше реагувати на зміни зовнішнього середовища.

Розвиток інформаційних технологій радикально змінив характер комунікацій, забезпечивши можливість миттєвого обміну даними та взаємодії підприємств на глобальному рівні. Унаслідок цього виникла потреба у формуванні теоретичних засад нової форми координації — мережевого управління, у межах якого ключовим ресурсом стали знання, інформація та інтелектуальні зв'язки між учасниками системи [56].

Мережеві підприємства визначаються як гнучкі структури, побудовані на принципах взаємодоповнюваності ресурсів, довіри та взаємовигоди. Вони функціонують не за ієрархічним принципом підпорядкування, а за принципом взаємної кооперації та обміну знаннями. Залежно від рівня інтеграції та ступеня взаємозалежності, мережеві системи можуть існувати у вигляді стратегічних альянсів, консорціумів, партнерських кластерів або когнітивних платформ, де відбувається постійний обмін інформацією між усіма учасниками.

Розвиток теорії мережевих підприємств базується на спільних підходах, згідно з якими мережа є самоорганізованою системою, що поєднує учасників навколо спільних цілей, спільних цінностей і взаємної вигоди. Її ефективність визначається не кількістю елементів, а щільністю комунікацій, швидкістю передачі знань та рівнем довіри між партнерами.

З позицій когнітивного управління проектами мережевий підхід трансформується у динамічну систему знань, у якій комунікаційні зв'язки перетворюються на канали обміну інформацією, досвідом і аналітичними висновками. Мережа стає носієм колективного інтелекту, що забезпечує узгодження дій між організаціями, підрядниками, консультантами та цифровими платформами. Структура такої системи може бути подана як багаторівнева когнітивно-мережева архітектура (рис. 2.12), у якій циркуляція знань є центральним елементом усіх управлінських процесів.



Рис. 2.12. Структура когнітивно-мережевої взаємодії в середовищі проекту
(розроблено автором на основі [56])

Для узагальнення наукових підходів і визначення ключових чинників ефективності мережевих підприємств сформовано таблицю 2.10, у якій систематизовано основні ознаки таких структур у контексті когнітивного управління [214].

Отже, мережевий підхід у межах когнітивного середовища проєкту розглядається як архітектура взаємопов'язаних знань, що формує основу колективного інтелекту організації. Така структура забезпечує безперервне навчання системи, підвищує гнучкість прийняття рішень і створює умови для інтеграції управлінських, технічних та інформаційних процесів.

Ефективність когнітивно-мережевих підприємств визначається не обсягом ресурсів, а здатністю системи створювати, поширювати та застосовувати знання у реальному часі, що робить їх ключовими елементами цифрової економіки знань.

Будівельний проєкт є складною когнітивно-соціальною системою, у якій поєднуються технічні, організаційні та інформаційні процеси, що динамічно взаємодіють між собою. Через багатовимірність і нелінійність цих зв'язків традиційні методи аналізу — структурно-функціональні, ієрархічні чи порівняльно-технологічні — не можуть адекватно описати внутрішню логіку системи. Їхня статичність і детермінованість не враховують складну природу зворотних інформаційних і когнітивних впливів, а також соціально-поведінкових аспектів командної взаємодії.

У межах когнітивного підходу будівельний проєкт розглядається як інтелектуальна мережа, де кожен учасник (підрядник, проєктант, інвестор, консультант) виконує роль активного елемента системи обміну знаннями. Взаємозв'язки між цими елементами формують інформаційно-комунікаційне поле, у якому циркулюють знання, досвід і управлінські рішення.

Таблиця 2.10.

Основні характеристики мережевих підприємств і показники ефективності когнітивної взаємодії (розроблено автором на основі [214])

Характеристика	Змістова інтерпретація	Показники ефективності
Принцип взаємодії	Горизонтальна кооперація на основі спільних цінностей	Узгодженість рішень, рівень взаємної довіри
Організаційна структура	Гнучка, децентралізована, побудована на інтеграції знань	Швидкість адаптації, когерентність зв'язків
Ключовий ресурс	Інформація, досвід, інтелектуальні активи	Індекс обміну знаннями, частота комунікацій
Механізм координації	Цифрові платформи, AI-аналітика, BIM-технології	Ефективність цифрової взаємодії (Ецв)
Критерій успіху	Комплементарність ресурсів і когнітивна синергія	Коефіцієнт синергії знань (Ксз)

Ефективність цього поля визначається рівнем інтеграції між трьома ключовими потоками:

- інформаційним, що описує обмін даними та аналітичними моделями;

- договірним, який регулює розподіл ролей і відповідальності;
- соціально-когнітивним, який відображає рівень довіри, залученості та комунікаційної узгодженості.

Стан гармонізації між цими потоками можна представити у вигляді індексу когнітивної щільності $C_d(t)$, який кількісно відображає ступінь когерентності між учасниками мережі:

$$C_d(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij}(t) \cdot \mu_{ij}(t) \cdot \varphi_{ij}(t)}{n \cdot (n-1)}, \quad (2.19)$$

де $p_{ij}(t)$ — ймовірність активної взаємодії між учасниками i та j у момент часу t ; $\mu_{ij}(t)$ — рівень взаємної довіри між ними; $\varphi_{ij}(t)$ — коефіцієнт когнітивної релевантності інформації, що передається; n — кількість вузлів мережі.

Індекс $C_d(t)$ зростає зі збільшенням частоти контактів, довіри й якості переданих знань, відображаючи ступінь узгодженості комунікаційного середовища. Зниження цього показника сигналізує про інформаційні розриви або зниження ефективності координації.

Важливим показником стабільності системи є її когнітивна стійкість, тобто здатність підтримувати узгоджений обмін знаннями за умов динамічних змін зовнішнього середовища. Цей показник можна оцінити через інтегральну функцію когнітивної стабільності S_k :

$$S_k = \int_0^T [\lambda(t) \cdot e^{-\sigma^2(t)} \cdot (\frac{1}{1+\delta(t)})] dt, \quad (2.20)$$

де $\lambda(t)$ — інтенсивність когнітивних взаємодій у системі; $\sigma^2(t)$ — дисперсія інформаційних потоків, що характеризує ступінь невизначеності; $\delta(t)$ — коефіцієнт комунікаційного опору, пов'язаний із затримками або спотвореннями даних; T — період спостереження.

Функція S_k визначає баланс між активністю взаємодії та стабільністю системи. Максимальні значення досягаються при високій частоті комунікацій і низькому рівні шуму в інформаційних каналах. Таким чином, когнітивна стійкість є критерієм збалансованості проєктної мережі, що дозволяє оцінити її готовність до змін і здатність до саморегуляції.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що будівельний проєкт у сучасних умовах функціонує як самоорганізована когнітивно-мережева система, де знання циркулюють між учасниками у вигляді інформаційних потоків різної інтенсивності. Ефективність такого проєкту визначається не обсягом ресурсів, а рівнем інтеграції та когерентності знань.

Застосування мережевого аналізу в цьому контексті дає змогу ідентифікувати критичні вузли взаємодії, визначити оптимальні траєкторії передачі інформації та виявити центри управлінського впливу. Поєднання когнітивного моделювання з математичними методами аналізу мереж дозволяє створити інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень, що здатні прогнозувати зміни ефективності взаємодії учасників і виявляти потенційні інформаційні дисфункції.

Отже, будівельні проекти можуть розглядатися не просто як набір виконавців і процесів, а як динамічні когнітивні екосистеми, у яких соціальні, інформаційні та технологічні елементи перебувають у постійній взаємодії, забезпечуючи емерджентні властивості — узгодженість, адаптивність і здатність до навчання.

Будівельні проекти функціонують у вигляді багаторівневих когнітивно-мережових систем, у яких взаємодіють різні типи зв'язків — інформаційні, комунікаційні, знаннєві та соціальні. Для їхнього дослідження доцільно розрізняти дві основні категорії мереж: інформаційно-орієнтовані та соціальні, що утворюють єдине середовище передачі знань і прийняття рішень.

Інформаційні мережі забезпечують циркуляцію даних, фактів і моделей у межах проекту. Їхня структура складається з трьох взаємопов'язаних шарів [276]:

- мережа зв'язку — неформальна система контактів між членами команди, що активується у кризових або непередбачуваних ситуаціях;
- інформаційна мережа — формалізована структура взаємодії, через яку відбувається обмін даними між підрозділами, консультантами та замовником;
- мережа знань — когнітивний рівень системи, у якому інформація трансформується у досвід, а досвід — у нові знання.

Соціальні мережі, у свою чергу, описують міжособистісні взаємини, що підтримують процеси комунікації та довіри. Їх можна поділити на формальні (адміністративні, договірні, контрактні) та неформальні (засновані на довірі, взаємній підтримці й особистих контактах). Гармонійне поєднання цих двох підсистем формує стійке когнітивне середовище проекту, у якому знання передаються швидко, без викривлень і конфліктів.

Для опису ступеня когерентності між різними видами мереж доцільно використовувати інтегральний коефіцієнт когнітивної взаємодії:

$$K_{int}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i \cdot \Phi_i(t) \cdot \Psi_i(t))}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \quad (2.21)$$

Де $\Phi_i(t)$ — інтенсивність обміну інформацією у підмережі i ; $\Psi_i(t)$ — рівень когнітивної взаємної релевантності знань; ω_i — ваговий коефіцієнт важливості кожного типу мережі; n — кількість підсистем у моделі.

Підвищення $K_{int}(t)$ означає синхронізацію потоків знань між усіма учасниками, тоді як його зниження сигналізує про інформаційні бар'єри або втрату довіри між елементами системи.

Водночас ефективність проектної мережі залежить від балансу між формальними та неформальними відносинами. Для цього пропонується функція когнітивної рівноваги:

$$E_{net} = \eta_f \cdot F_{form}(t) + \eta_n \cdot N_{inform}(t) - \kappa \cdot \Delta_{conf}(t), \quad (2.22)$$

Де E_{net} — інтегральна ефективність комунікаційної структури; $F_{form}(t)$ — інтенсивність формальних контактів; $N_{inform}(t)$ — щільність неформальних зв'язків; $\Delta_{conf}(t)$ — показник комунікаційних конфліктів; η_f, η_n, κ — вагові коефіцієнти впливу.

Максимальне значення E_{net} відповідає стану рівноваги, коли інформаційна дисципліна (формальні механізми) поєднується із соціальною гнучкістю (неформальні канали), а когнітивні бар'єри мінімізовані.

Цілісне уявлення про взаємодію між цими системами наведено на рисунку 2.13, який демонструє інтегровану структуру потоків у когнітивному середовищі будівельного проекту.

Когнітивна архітектура будівельного проекту являє собою мережеву систему подвійної природи — техніко-інформаційної та соціально-комунікаційної. Вона поєднує формальні канали управління з неформальними механізмами комунікації, забезпечуючи узгоджений потік знань і високу когнітивну стійкість системи.

Застосування таких моделей дає змогу не лише кількісно оцінювати рівень інтеграції мереж, а й оптимізувати структуру обміну знаннями, прогнозуючи ефективність управлінських рішень у динамічному середовищі проекту [197].

Ефективне управління знаннями у будівельному проєкті неможливе без кількісного опису динаміки їхнього обміну між учасниками.

У когнітивно-мережевій системі знання розглядаються як інформаційно-енергетичний потік, що циркулює між вузлами (учасниками) мережі у часі.

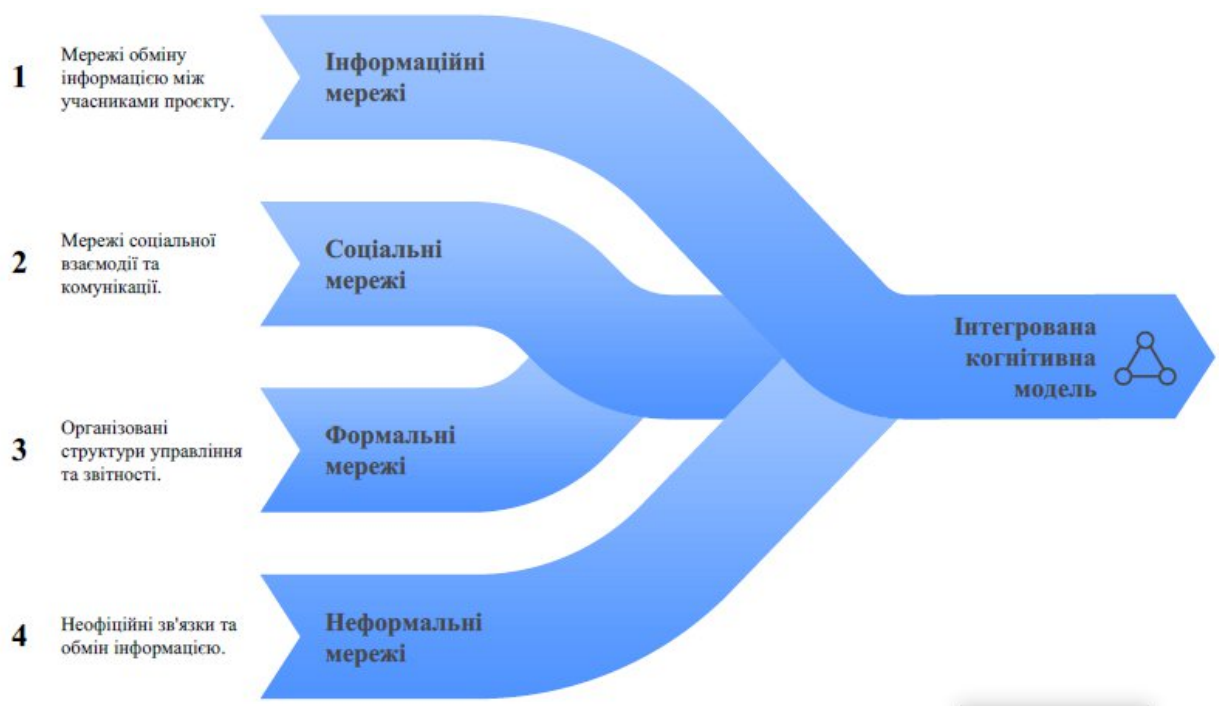


Рис. 2.13. Інтегрована когнітивна модель взаємодії інформаційних, соціальних, формальних і неформальних мереж у середовищі будівельного проєкту
(розроблено автором на основі [197])

Основна ідея полягає в тому, що кожен вузол не лише споживає знання, а й генерує нові, змінюючи когнітивний потенціал системи. Цей процес можна формалізувати через рівняння циркуляції знань у мережевому середовищі:

$$\frac{dZ_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^n [\kappa_{ij} \cdot (Z_j(t) - Z_i(t)) \cdot \mu_{ij}(t)] - \rho_i \cdot Z_i(t), \quad (2.23)$$

де $Z_i(t)$ — когнітивний потенціал (обсяг актуальних знань) i -го учасника у момент часу t ; κ_{ij} — коефіцієнт пропускну здатності каналу обміну знаннями між учасниками i і j ; $\mu_{ij}(t)$ — динамічний коефіцієнт довіри (соціально-когнітивний фільтр); ρ_i — параметр втрат знань (забування, неактуальність, конфлікт інформації); n — кількість елементів у системі.

Це рівняння описує зміну знань у кожному вузлі як суму вхідних потоків від інших учасників мінус втрати когнітивного ресурсу.

Якщо в системі зростає рівень довіри ($\mu_{ij} \rightarrow 1$), відбувається посилення когнітивної циркуляції; натомість за низьких значень μ_{ij} , знання ізолюються в межах окремих підсистем.

Для інтегральної оцінки циркуляції знань у всій системі вводиться показник когнітивного потоку $Q_k(t)$:

$$Q_k(t) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \kappa_{ij} \cdot \mu_{ij}(t) \cdot |Z_j(t) - Z_i(t)|, \quad (2.24)$$

Значення $Q_k(t)$ демонструє загальну інтенсивність обміну знаннями в проєктній мережі:

чим більший розрив когнітивних потенціалів між учасниками та чим вищий рівень взаємної довіри, тим швидше система переходить у стан когнітивної синхронізації.

Довгостроковий стан рівноваги у такій системі досягається тоді, коли:

$$\frac{dZ_i(t)}{dt} \rightarrow 0 \Rightarrow Z_i(t) \approx Z_j(t), \forall i, j \in N, \quad (2.25)$$

що означає когнітивну конвергенцію — усі учасники володіють однаковим рівнем релевантних знань, і мережа працює як цілісний інтелектуальний організм.

Для кращого розуміння взаємозв'язків між учасниками будівельного проєкту та механізмів поширення знань доцільно представити модель циркуляції когнітивних потоків у графічному вигляді, як показано на рисунку 2.5. Наведено узагальнену схему, яка відображає, як знання переміщуються між ключовими вузлами проєктної мережі — замовником, проєктантом, підрядником і консультантом. У ній стрілками позначено напрями обміну знаннями, товщина ліній характеризує інтенсивність взаємодії, а взаємні зв'язки демонструють баланс між передачею та сприйняттям інформації. Система є динамічною: зміна параметрів довіри, відкритості чи когнітивного потенціалу одного учасника спричиняє перебудову всієї структури обміну. У результаті формується когнітивна мережа, здатна до самоорганізації, адаптації та навчання, що забезпечує узгодженість рішень у межах будівельного проєкту (рис. 2.14) [162].

Отже, когнітивна циркуляція знань у інтегрованій мережі будівельного проєкту є динамічним процесом енергетичного обміну інформацією, що підтримується взаємною довірою, соціальною взаємодією та технологічними каналами зв'язку. Чим вищі значення параметрів κ_{ij} і μ_{ij} , тим більша когнітивна зв'язаність системи, що безпосередньо впливає на її стійкість і здатність до самонавчання.

Таким чином, математична модель циркуляції знань дозволяє [55]:

- кількісно оцінювати динаміку обміну знаннями між учасниками;
- прогнозувати стани когнітивної рівноваги мережі;
- ідентифікувати ключові вузли впливу, через які варто керувати потоком інформації для підвищення ефективності управління проектом.

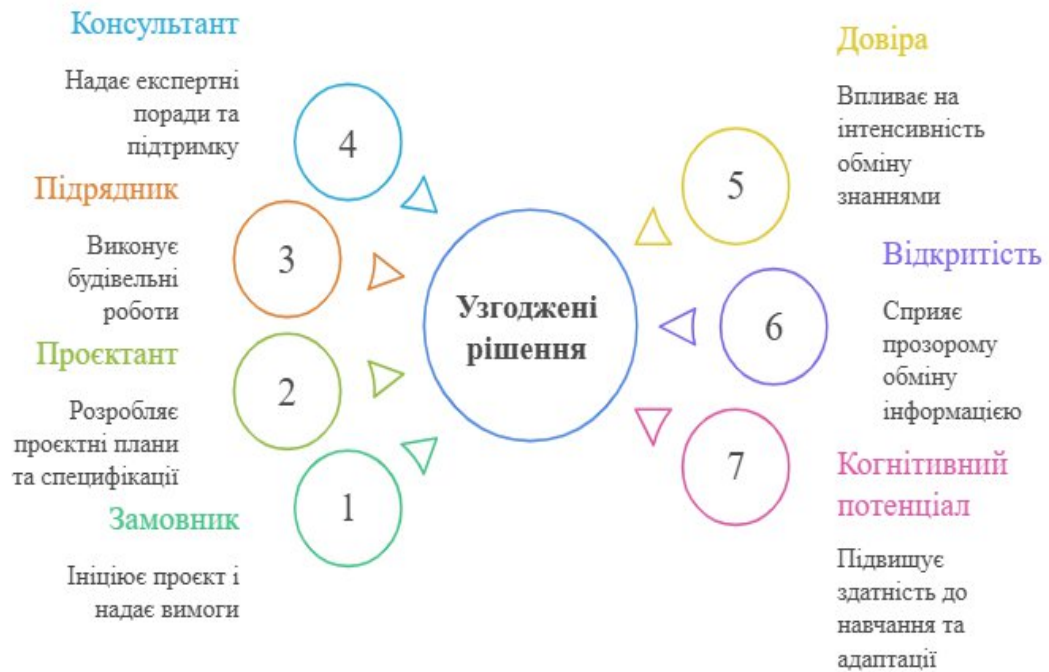


Рис. 2.14. Когнітивна модель циркуляції знань у інтегрованій мережі будівельного проекту (розроблено автором на основі [162])

РОЗДІЛ 3. АНАЛІТИКО-СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ СИНЕРГЕТИЧНИХ ЕФЕКТІВ ІНТЕГРАЦІЇ ВІМ-ТЕХНОЛОГІЙ У УПРАВЛІННІ ЗНАННЯМИ

3.1. Ідентифікація джерел і структур синергетичного ефекту в інтегрованих будівельних проектах

Інтегровані будівельні проекти в сучасних умовах дедалі частіше реалізуються як складні організаційно-економічні системи, у межах яких взаємодіють численні учасники, пов'язані між собою не лише контрактними відносинами, але й багатовимірними потоками ресурсів, інформації та знань. За таких умов результативність проекту не може бути адекватно описана виключно через індивідуальні показники ефективності окремих суб'єктів. Натомість ключового значення набуває оцінка сукупного ефекту інтеграції, матеріалізованим проявом якого є синергетичний ефект.

Синергія в інтегрованих будівельних проектах постає не як одноразовий результат, а як динамічний процес, що формується внаслідок взаємодії учасників проектної мережі. Саме тому ідентифікація її джерел і структур потребує системного підходу, який дозволяє поєднати ресурсні, організаційні, інформаційні та економічні аспекти інтеграції в єдину аналітичну рамку.

У загальному вигляді інтеграція передбачає участь двох або більше суб'єктів, що об'єднують свої можливості задля досягнення спільної мети. Водночас ефективність такої взаємодії може оцінюватися як з позиції кожного окремого учасника, так і з позиції кінцевого сукупного результату, який перевищує просту суму індивідуальних ефектів. Саме ця властивість — перевищення сукупного результату над арифметичною сумою складових — є фундаментальною ознакою синергетичного ефекту [55].

Концептуальні витoki такого підходу сягають ще античної філософії, де було сформульовано ідею про те, що «ціле більше суми його частин». У подальшому розвитку економічної думки ця ідея набула прикладного змісту в контексті інтеграційних процесів, зокрема в корпоративному управлінні, стратегічному плануванні та організації складних виробничих систем. У межах інтегрованих будівельних проектів синергія постає як економічна категорія, тісно пов'язана з ефективністю використання як матеріальних, так і нематеріальних активів.

Важливо підкреслити, що синергетичний ефект не є автоматичним наслідком інтеграції. Його виникнення залежить від того, наскільки узгоджено та системно вибудовані взаємозв'язки між учасниками проекту, яким чином організовано управління ресурсами, інформаційними потоками та прийняттям рішень. У цьому контексті синергія має розглядатися не як статичний показник, а як результат процесів координації, адаптації та навчання, що розгортаються протягом усього життєвого циклу проекту [365].

Особливого значення в інтегрованих будівельних проектах набуває ресурсна природа синергії. Вона формується на перетині двох груп ресурсів: фізичних та нематеріальних. До фізичних ресурсів належать основні засоби, виробничі потужності, матеріальні запаси та інфраструктурні об'єкти. Їх інтеграція створює передумови для підвищення рівня завантаження, усунення дублювання функцій та досягнення економії за рахунок масштабу. Водночас саме нематеріальні активи — знання, технології,

управлінські компетенції, корпоративна культура — є базою для формування глибшого, стійкішого синергетичного ефекту, який не може бути легко відтворений конкурентами.

У цьому сенсі доцільно розрізняти комплементарний ефект, що виникає внаслідок більш повного використання фізичних ресурсів, та власне синергетичний ефект, який формується при інтеграції нематеріальних активів. Для будівельних проєктів із мережевою організаційною структурою другий тип ефекту є не лише більш складним для ідентифікації, але й більш значущим з точки зору довгострокової ефективності.

Суттєвим аспектом аналізу синергії є розуміння того, у який спосіб вона проявляється в економічних результатах інтегрованої структури. З позицій економічної логіки синергетичний ефект може реалізовуватися у двох базових формах: через скорочення сукупних витрат або через збільшення доходів. Перша форма пов'язана з явищем субаддитивності, коли об'єднання ресурсів дозволяє знизити витрати порівняно з сумарними витратами окремих учасників. Друга форма відображає супераддитивність, за якої інтеграція створює можливості для зростання доходів, недосяжні для суб'єктів у разі їх ізольованого функціонування [74].

У межах інтегрованих будівельних проєктів ці форми синергії проявляються через оптимізацію операційних процесів, зниження транзакційних витрат, посилення ринкових позицій, доступ до нових сегментів ринку та підвищення інвестиційної привабливості. Узагальнену логіку формування синергетичного ефекту в інтегрованому проєкті доцільно представити у вигляді концептуальної схеми.

На рисунку 3.1 показано взаємозв'язок між інтеграцією ресурсів, процесами координації та економічними результатами у формі субаддитивних і супераддитивних ефектів.

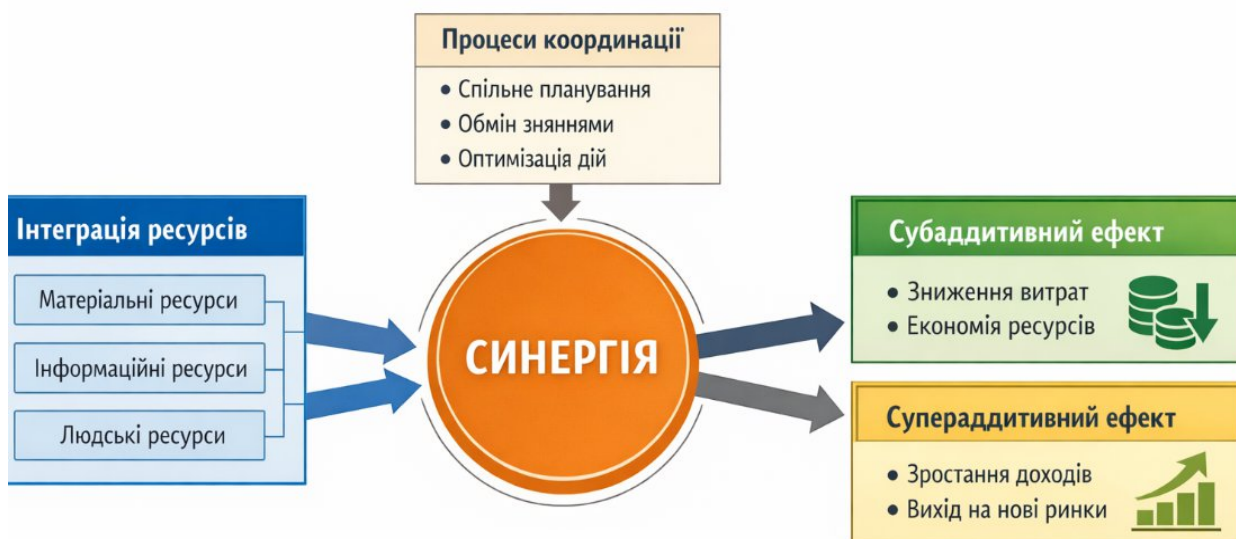


Рис. 3.1. Логіка формування синергетичного ефекту в інтегрованому будівельному проєкті (розроблено автором на основі [147])

Подальший аналіз синергії потребує переходу від загальної концептуалізації до структурного розгляду напрямів її формування. У сучасній економічній науці прийнято виокремлювати операційну, фінансову та інвестиційну складові діяльності підприємств,

що дозволяє систематизувати джерела синергетичного ефекту відповідно до функціональної логіки управління.

Операційна діяльність у будівельних проєктах охоплює процеси, безпосередньо пов'язані зі створенням будівельної продукції та є основним джерелом доходів. Синергія в цій площині виникає, зокрема, за рахунок усунення дублювання функцій, спільного використання обладнання, оптимізації логістичних ланцюгів і підвищення продуктивності праці. Фінансова діяльність, у свою чергу, пов'язана зі структурою капіталу, доступом до фінансування та управлінням ризиками [215]. Інтеграція дозволяє знизити вартість капіталу, підвищити кредитоспроможність та забезпечити більшу фінансову гнучкість. Інвестиційна діяльність формує довгострокову основу синергії через спільну реалізацію проєктів, які не могли б бути здійснені окремими учасниками. Узагальнення основних джерел синергетичного ефекту за цими напрямками наведено в таблиці 3.1.

Подальший розвиток дослідження синергетичного ефекту в інтегрованих будівельних проєктах потребує акцентування уваги на тих формах взаємодії, які не зводяться виключно до об'єднання матеріальних ресурсів або фінансових потоків. У сучасних умовах дедалі більшої ваги набуває інформаційна та знаннява складова синергії, що формується в межах мережевих організаційних структур, характерних для складних будівельних проєктів.

Таблиця 3.1

Основні джерела синергетичного ефекту в інтегрованих будівельних проєктах
(розроблено автором на основі [215])

<i>Напрямок синергії</i>	<i>Ключові джерела формування</i>	<i>Економічний прояв</i>
<i>Операційна</i>	Усунення дублювання процесів, економія за рахунок масштабу, оптимізація ресурсів	Зниження витрат, зростання продуктивності
<i>Фінансова</i>	Дешевший доступ до капіталу, зниження ризиків, податкові вигоди	Зменшення вартості капіталу, стабілізація грошових потоків
<i>Інвестиційна</i>	Спільні проєкти, використання синергії активів, розширення можливостей зростання	Зростання майбутніх доходів, підвищення вартості проєкту

Як справедливо зазначає К. Ерроу, інформація є специфічним економічним ресурсом, який принципово відрізняється від матеріальних активів тим, що її використання одним суб'єктом не зменшує можливостей використання іншими. Саме ця властивість зумовлює потенціал інформаційної синергії, коли обмін знаннями між учасниками інтегрованого проєкту створює додану вартість без пропорційного зростання витрат [195]. У будівельних проєктах, де значна частина рішень ухвалюється в умовах невизначеності, своєчасність, повнота та інтерпретованість інформації стають критичними чинниками ефективності.

Інформаційна синергія виникає не стільки внаслідок самого факту наявності інформації, скільки в результаті оптимізації комунікаційних зв'язків, через які відбувається передача знань між замовником, проєктувальником, підрядником, консультантами та іншими учасниками проєктної мережі. У цьому контексті доречно звернутися до підходів Т. Девенпорта, який розглядає знання як результат

структурованого поєднання інформації, досвіду та контексту. В інтегрованих будівельних проєктах саме контекст спільної діяльності створює умови для перетворення інформації на знання, а знань — на синергетичний ефект [26].

На відміну від класичних ієрархічних структур управління, мережеві організаційні форми характеризуються горизонтальними зв'язками, множинністю центрів прийняття рішень та високою інтенсивністю зворотних зв'язків. За таких умов синергія формується як результат узгодження дій автономних, але взаємозалежних агентів, а не як наслідок директивного перерозподілу ресурсів. Саме тому інформаційна синергія є найбільш складною для формалізації, але водночас найбільш стійкою з погляду довгострокової конкурентоспроможності [53].

Узагальнену структуру інформаційної синергії в інтегрованому будівельному проєкті доцільно продемонструвати на рисунку 3.2, яка відображає рух інформаційних і когнітивних потоків між ключовими учасниками проєктної мережі.

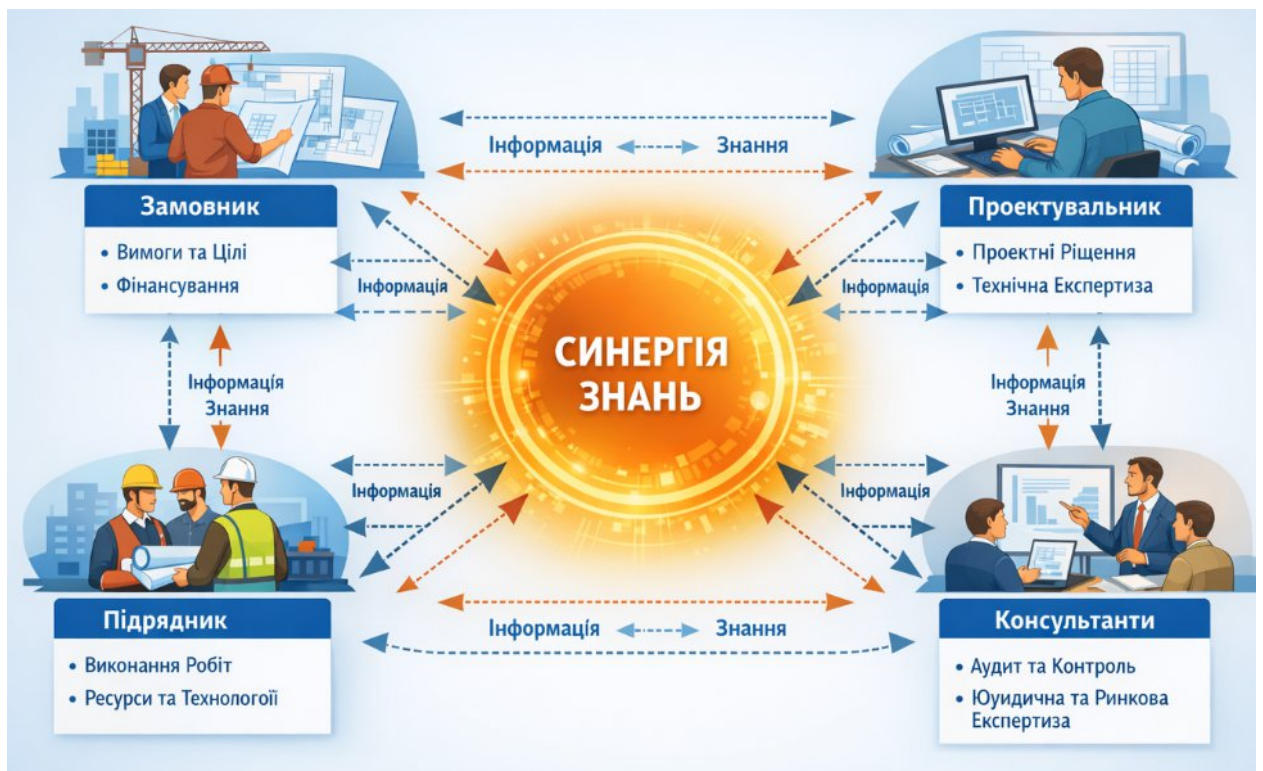


Рис. 3.2. Формування інформаційної синергії в мережевій структурі інтегрованого будівельного проєкту (розроблено автором на основі [53])

Перехід до аналізу структур синергії потребує також врахування теорії конкурентних переваг і ресурсного підходу до стратегічного управління. Як зазначає М. Портер, стійка конкурентна перевага формується не лише за рахунок позиціонування на ринку, а й через ефективну конфігурацію внутрішніх процесів у ланцюжку створення цінності [29]. У межах інтегрованих будівельних проєктів цей ланцюжок охоплює як первинні види діяльності (проектування, будівництво, логістика, здача об'єкта), так і допоміжні (управління персоналом, фінансування, інформаційні системи, контроль якості).

Синергія виникає тоді, коли взаємодія між цими видами діяльності виходить за межі простого узгодження і перетворюється на взаємне підсилення результатів. Наприклад, інтеграція проєктних і будівельних функцій дозволяє скоротити кількість змін у проєктній документації на етапі реалізації, що безпосередньо знижує витрати та ризики. Аналогічно, інтеграція фінансового планування з календарно-ресурсним плануванням підвищує точність прогнозування грошових потоків і зменшує ймовірність дефіциту ліквідності.

Ресурсна теорія фірми, представлена роботами Дж. Барні та Р. Гранта, дозволяє поглибити розуміння природи синергетичного ефекту. Згідно з цим підходом, конкурентні переваги виникають унаслідок використання ресурсів, які є цінними, рідкісними, важко імітованими та організаційно вбудованими. В інтегрованих будівельних проєктах такими ресурсами часто виступають саме комплементарні знання та компетенції різних учасників, які окремо не створюють унікальної цінності, але в поєднанні формують синергетичний результат [243].

У цьому контексті синергію доцільно розглядати як механізм трансформації різнорідних ресурсів у системну перевагу. Вона не зводиться до механічного додавання активів, а є наслідком організаційної здатності інтегрувати ресурси в межах єдиної управлінської логіки. Саме ця здатність визначає, чи стане інтеграція джерелом зростання ефективності, чи, навпаки, призведе до ускладнення управління та втрати контролю.

З позицій економічного аналізу важливим є розмежування структур синергії за характером їх впливу на грошові потоки інтегрованого проєкту. Операційна синергія, як правило, проявляється у скороченні змінних і постійних витрат за рахунок економії від масштабу та обсягу. У будівельних проєктах це може бути досягнуто шляхом централізації закупівель, стандартизації технологічних рішень, спільного використання техніки та інфраструктури.

Фінансова синергія, у свою чергу, пов'язана зі зниженням вартості капіталу та стабілізацією грошових потоків. Об'єднання проєктів або компаній у межах інтегрованої структури дозволяє підвищити кредитний рейтинг, диверсифікувати ризики та оптимізувати структуру капіталу. Як зазначає Р. Брігхем, фінансова синергія є одним із ключових мотивів інтеграційних рішень, оскільки вона безпосередньо впливає на ринкову вартість бізнесу.

Інвестиційна синергія формує довгостроковий ефект, пов'язаний із можливістю реалізації проєктів, які були б недоступні окремим учасникам. У будівельній галузі це особливо актуально для масштабних інфраструктурних проєктів, що потребують значних капіталовкладень, високого рівня експертизи та складної координації [279].

Узагальнену систему структур синергії в інтегрованому будівельному проєкті представлено на рисунку 3.3.

Особливу увагу в межах даного дослідження доцільно приділити тому, що синергетичний ефект не є лінійним і не виникає автоматично зі зростанням масштабів інтеграції. Навпаки, надмірна складність організаційної структури може призвести до зростання трансакційних витрат і зниження ефективності. Це положення узгоджується з підходами О. Вільямсона, який наголошує на необхідності порівняння вигод інтеграції з витратами координації.

Ідентифікація джерел і структур синергетичного ефекту в інтегрованих будівельних проєктах дозволяє розглядати синергію не як абстрактну економічну

категорію, а як інструмент управлінського аналізу, що пов'язує ресурси, процеси та результати в єдину логічну систему [58]. Саме така інтерпретація створює методологічне підґрунтя для подальшої розробки моделей оцінювання синергетичного ефекту та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.



Рис. 3.3. Структури синергетичного ефекту в інтегрованому будівельному проєкті
(розроблено автором на основі [58])

Подальше осмислення синергетичного ефекту в інтегрованих будівельних проєктах потребує переходу від загальної структуризації його видів до аналізу механізмів трансформації синергії в управлінсько значущий результат. Саме на цьому етапі синергія перестає бути суто теоретичною конструкцією і набуває прикладного змісту як інструмент підвищення результативності інтегрованих проєктних систем.

Ключовою ознакою синергетичного ефекту є його системний характер. Синергія не локалізується в окремому елементі організації, процесі чи ресурсі, а виникає в результаті їх взаємодії в межах цілісної структури. Це положення узгоджується з системною теорією управління та підходами, розробленими Л. фон Берталанфі, відповідно до яких властивості системи не можуть бути повністю пояснені через аналіз її складових елементів окремо. У будівельних проєктах це означає, що синергетичний ефект формується на перетині організаційної, економічної, інформаційної та поведінкової підсистем. [238]

Особливої уваги потребує поведінковий вимір синергії, який у традиційних економічних моделях часто залишається поза межами аналізу. В умовах інтегрованих будівельних проєктів взаємодія між учасниками ґрунтується не лише на формальних контрактах, але й на рівні довіри, готовності до обміну знаннями, здатності до колективного навчання та спільного прийняття рішень. Як зазначає Г. Саймон, обмежена раціональність суб'єктів управління зумовлює необхідність колективних форм

координації, в межах яких саме синергія стає механізмом компенсації індивідуальних обмежень [152].

У цьому контексті синергетичний ефект може розглядатися як інституційний результат, що виникає внаслідок узгодження формальних і неформальних правил взаємодії. Інтегровані будівельні проекти, особливо ті, що реалізуються у форматі стратегічних альянсів або проектних консорціумів, формують власні інституційні середовища, у межах яких синергія стає відображенням зрілості управлінських практик.

З методологічної точки зору ідентифікація синергетичного ефекту потребує чіткого розмежування між потенціалом синергії та її фактичним проявом. Потенціал синергії визначається наявністю комплементарних ресурсів, можливостей для координації та інтеграції процесів. Водночас фактичний синергетичний ефект реалізується лише за умови ефективного управління цими можливостями. Таким чином, синергія є не лише результатом інтеграції, але й показником якості управління інтегрованим проектом.

У практичному вимірі це означає, що одна й та сама конфігурація ресурсів може призводити до різних рівнів синергетичного ефекту залежно від обраної моделі управління. Саме тому в інтегрованих будівельних проектах дедалі частіше застосовуються гібридні організаційні структури, що поєднують елементи ієрархічного, процесного та мережевого управління. Такі структури дозволяють знизити транзакційні витрати, водночас зберігаючи гнучкість і адаптивність, необхідні для формування синергії [151].

Важливим етапом завершального аналізу є узагальнення факторів, що посилюють або, навпаки, обмежують синергетичний ефект в інтегрованих будівельних проектах. До факторів посилення синергії слід віднести високий рівень інформаційної прозорості, узгодженість стратегічних цілей учасників, наявність інтегрованих інформаційних систем управління проектом, а також сформовану культуру співпраці. Обмежувальними факторами, у свою чергу, виступають асиметрія інформації, конфлікти інтересів, надмірна складність організаційної структури та недостатній рівень управлінських компетенцій [37].

Систематизація цих факторів дозволяє перейти до формування узагальненої моделі ідентифікації синергетичного ефекту, представленої на рисунку 3.4, яка поєднує структурні та процесні характеристики інтегрованого будівельного проекту.

У межах запропонованої моделі синергія розглядається як багаторівневий результат, що формується під впливом як внутрішніх, так і зовнішніх чинників. Внутрішній контур охоплює ресурси, процеси та організаційну структуру проекту, тоді як зовнішній контур пов'язаний із ринковим середовищем, інституційними умовами та конкурентним тиском. Такий підхід дозволяє врахувати специфіку будівельної галузі, для якої характерні висока капіталомісткість, тривалі цикли реалізації та значна залежність від зовнішніх умов [17].

Для аналітичного забезпечення процесу ідентифікації синергетичного ефекту доцільно використовувати систему індикаторів, що дозволяють оцінити як кількісні, так і якісні аспекти синергії. Узагальнений перелік таких індикаторів наведено в таблиці 3.2.

Доповненням до системи індикаторів є класифікація синергії за рівнями управління інтегрованим будівельним проектом, що дозволяє простежити, на якому рівні формується той чи інший ефект і яким чином він транслюється в загальний результат [66].

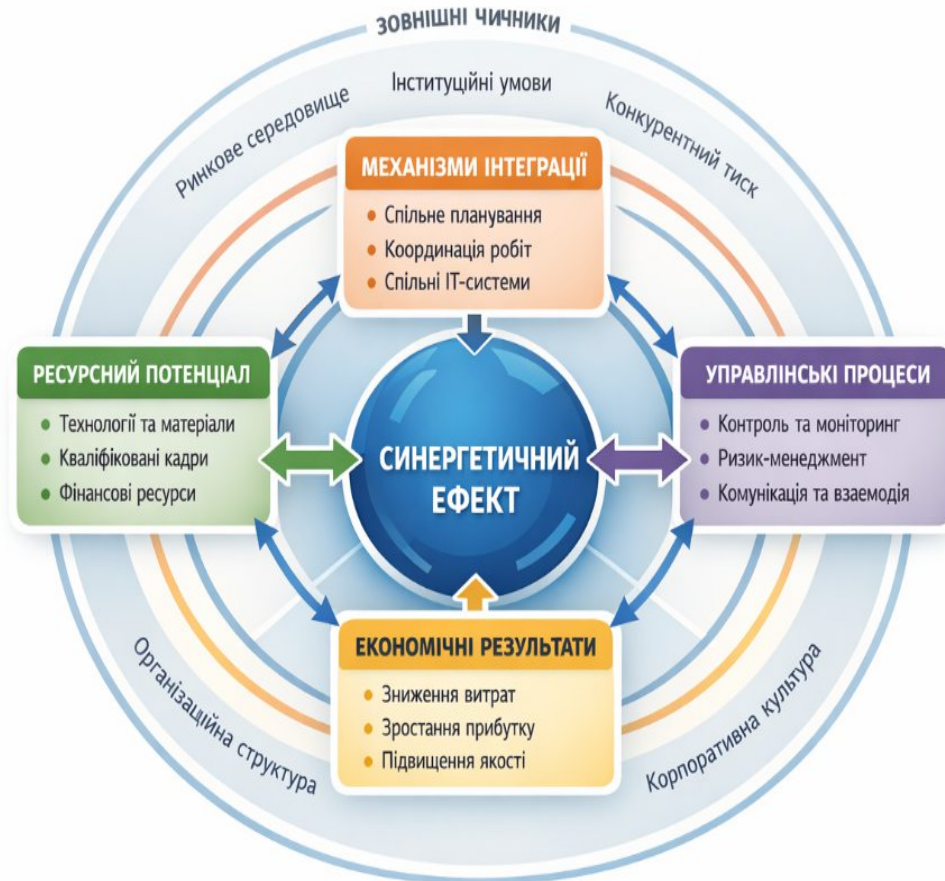


Рис. 3.4. Модель ідентифікації синергетичного ефекту в інтегрованому будівельному проєкті (розроблено автором на основі [37])

Таблиця 3.2

Індикатори ідентифікації синергетичного ефекту в інтегрованих будівельних проєктах (розроблено автором на основі [17])

Група індикаторів	Характеристика	Приклад прояву
Економічні	Відображають фінансові результати інтеграції	Скорочення витрат, зростання прибутковості
Операційні	Характеризують ефективність процесів	Скорочення строків реалізації, зниження простоїв
Інформаційні	Відображають якість обміну інформацією	Зменшення кількості помилок у проєктній документації
Організаційні	Характеризують узгодженість дій учасників	Підвищення швидкості прийняття рішень
Поведінкові	Відображають рівень довіри та співпраці	Зростання готовності до обміну знаннями

Таблиця 3.3

Рівні формування синергетичного ефекту в інтегрованих будівельних проєктах
(розроблено автором на основі [286])

<u>Рівень</u>	<u>Характеристика синергії</u>	<u>Управлінський фокус</u>
Стратегічний	Формування довгострокових конкурентних переваг	Узгодження цілей, стратегічні альянси
Тактичний	Оптимізація бізнес-процесів	Координація функцій і ресурсів
Операційний	Підвищення ефективності виконання робіт	Управління строками, витратами, якістю

Завершуючи аналіз, слід підкреслити, що синергетичний ефект в інтегрованих будівельних проєктах є багатовимірною категорією, яка поєднує економічні, організаційні, інформаційні та поведінкові аспекти. Його ідентифікація можлива лише за умови системного підходу, що враховує не лише результати, але й процеси, через які ці результати досягаються.

Проведене дослідження дозволяє сформулювати цілісне бачення природи, джерел і структур синергетичного ефекту в інтегрованих будівельних проєктах та окреслити його роль як системоутворювального чинника результативності управління. Синергія в межах таких проєктів постає не як побічний наслідок інтеграції, а як цілеспрямовано сформований результат узгодженої взаємодії ресурсів, процесів і управлінських рішень, що функціонують у межах єдиної проєктної системи.

Було обґрунтовано, що синергетичний ефект має процесну та багаторівневу природу. Він формується в динаміці, протягом життєвого циклу проєкту, і проявляється на стратегічному, тактичному та операційному рівнях управління. На стратегічному рівні синергія матеріалізується у вигляді довгострокових конкурентних переваг інтегрованої проєктної структури; на тактичному — через оптимізацію бізнес-процесів і координацію функцій; на операційному — через скорочення витрат, строків та підвищення якості виконання будівельних робіт [196].

Далі, доведено, що ключовим положенням є розмежування потенціалу синергії та фактичного синергетичного ефекту. Наявність комплементарних ресурсів, партнерських відносин і інтегрованих організаційних форм створює лише потенціал синергії. Її реальна реалізація залежить від якості управління, ефективності інформаційних потоків, рівня довіри між учасниками та здатності системи до колективного навчання й адаптації.

Аналітичну інтерпретацію зазначеного положення доцільно подати у вигляді графічної залежності, що відображає співвідношення між рівнем інтеграції учасників будівельного проєкту та величиною досягнутого економічного результату (рис. 3.5).

Як показано, синергетичний ефект не є лінійною функцією рівня інтеграції. На початкових етапах інтеграційних процесів економічний результат зростає повільно через високі транзакційні витрати та необхідність адаптації учасників. Подальше зростання рівня координації та узгодженості управлінських рішень забезпечує супераддитивний ефект, що проявляється у випереджальному зростанні сукупного результату. Водночас надмірна ускладненість організаційної структури або неузгодженість інтересів може призвести до зниження ефективності, що підтверджує необхідність оптимального, а не максимального рівня інтеграції.

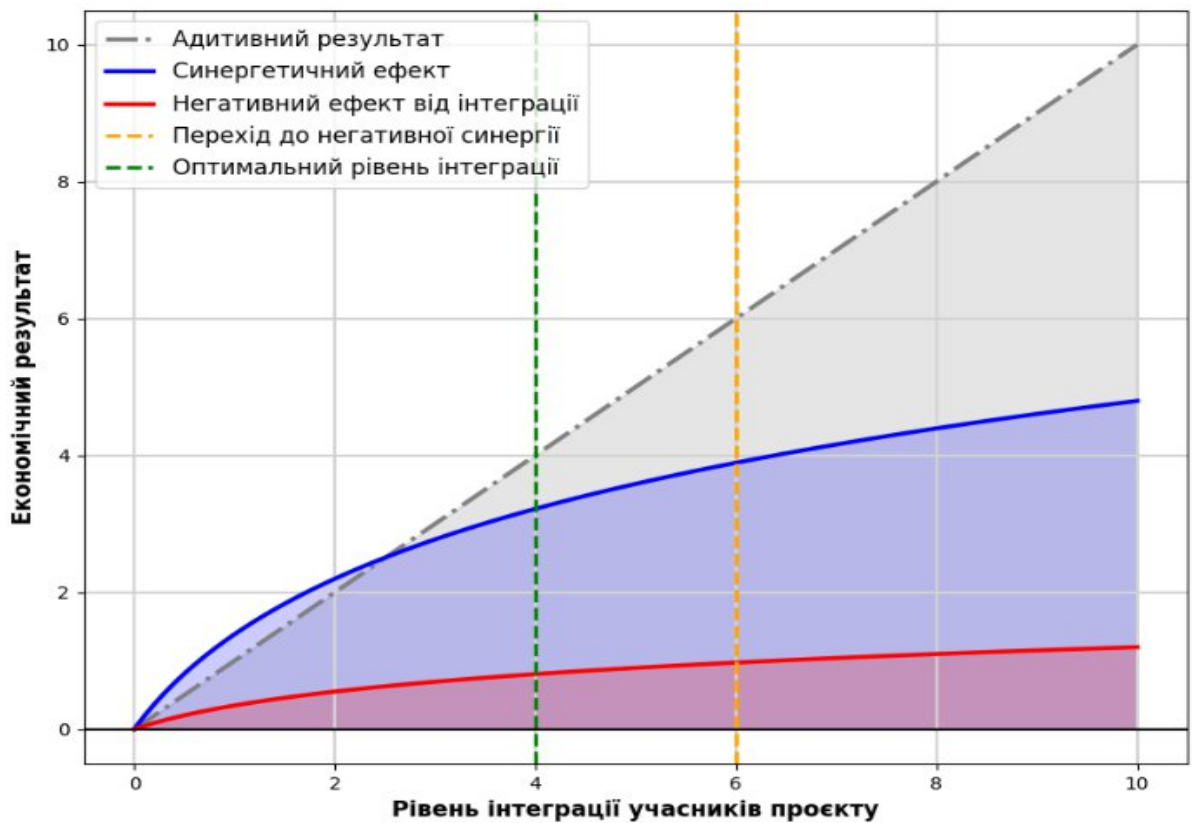


Рис. 3.5. Графік аналітичної оцінки синергетичного ефекту в інтегрованому будівельному проекті (розроблено автором на основі [196])

По-третє, встановлено, що в інтегрованих будівельних проектах домінуючу роль відіграє інформаційна синергія, яка формується внаслідок оптимізації комунікаційних зв'язків і перетікання знань між учасниками проектної мережі. Саме вона забезпечує мультиплікативний ефект для операційної, фінансової та інвестиційної синергії, виступаючи їхнім каталізатором. По-четверте, синергетичний ефект у будівельних проектах доцільно інтерпретувати як економічний результат супераддитивного та субаддитивного типів. Це дозволяє не лише концептуально, а й аналітично пов'язати синергію з показниками витрат, доходів і вартості проекту. По-п'яте, результати розділу дають підстави розглядати синергію як аналітичну категорію, придатну до формалізації та кількісного оцінювання. Це створює основу для подальшої побудови моделей оцінювання синергетичного ефекту та їх інтеграції в систему управлінських рішень у межах наступних розділів монографії.

3.2. Порівняльний аналіз міжнародного досвіду застосування когнітивно-орієнтованих BIM-платформ

Зі стрімким розвитком технологій у будівельній сфері трансформуються підходи до проектування, зростають вимоги замовників і стандарти якості виконання робіт. Сучасні проекти вирізняються високою складністю, великою кількістю стейкхолдерів і збільшенням обсягу проектної документації. У цих умовах традиційні інструменти управління часто не забезпечують належної точності та оперативності, що зумовлює потребу у впровадженні цифрових методологій, здатних інтегрувати планування,

реалізацію та експлуатацію. Таку роль виконує Building Information Modeling (BIM) — інформаційне моделювання споруд, яке фактично стало цифровим стандартом галузі та основою уніфікованого обміну даними між учасниками проєкту [10].

Міжнародна практика засвідчує широку географію поширення BIM. Рішення Європарламенту 2014 року рекомендувало державам-членам ЄС застосовувати BIM у публічних закупівлях, що стало каталізатором цифровізації та формування стандартизованих підходів до проєктування й реалізації інфраструктурних об'єктів. На цій основі поступово вибудовується сумісність форматів даних і процедур закупівель, що полегшує транскордонну кооперацію та підвищує прозорість інвестиційних процесів [76].

Показовим для пострадянського простору є досвід Республіки Білорусь, де затверджено «Галузеву програму з розробки та впровадження інформаційних технологій комплексної автоматизації проєктування та підтримки життєвого циклу будівлі, споруди на 2012–2015 роки». Документ задекларував підвищення ефективності виробництва, якості та конкурентоспроможності за рахунок сучасних цифрових рішень, включно з автоматизацією проєктування та стандартизацією інформаційних процесів. Водночас акценти програми переважно технічні: інтеграція CAD/BIM, розвиток IT-супроводу життєвого циклу, створення освітніх треків і стандарти. Менш розробленими залишилися економіко-управлінські механізми масштабування — моделі стимулювання, KPI ефективності, контрактні схеми та інструменти моніторингу, що стримує перехід від технологічних пілотів до системних організаційних ефектів [314].

Для наочності зіставимо регіональні підходи й пріоритети впровадження BIM (табл. 3.4), аби показати різницю в регуляторній підтримці, зрілості ринку та домінантних цілях.

Таблиця 3.4.

Порівняльна характеристика розвитку BIM-технологій у світі
(розроблено автором на основі [314])

Регіон	Характеристика впровадження	Рівень державної підтримки	Основні напрями розвитку
Європейський Союз	Широке застосування у публічних закупівлях; гармонізація стандартів обміну даними	Високий (настанови ЄП; національні мандати)	Цифрова інтеграція, сталий розвиток, LCA/LCC
Північна Америка	Активне використання приватним сектором і великими замовниками	Середній (ініціативи штатів/агентств)	4D/5D-планування, скорочення варіацій і RFI
Китай	Формування нормативної та стандартної бази	Середній, із тенденцією зростання	Національні платформи даних, уніфікація BIM-вимог
Білорусь	Пілотні програми автоматизації проєктування	Низький	Освітні ініціативи, стандартизація IT-процесів
Україна	Початковий етап системної інтеграції	Формується	Розробка нормативів, підготовка кадрів, адаптація практик ЄС

Галузь рухається від фрагментарної автоматизації до цілісних цифрових екосистем, де дані стають керованим активом. Для України доцільно паралельно розвивати три контури: регуляторний (мінімальні BIM-вимоги в закупівлях і стандарти обміну), інституційний (посилення ролі замовника як «власника даних», методичні центри, навчання), економічний (КРІ ефективності, контрактні моделі, що винагороджують результат). Це дозволить конвертувати технологічну зрілість у вимірювані організаційно-економічні ефекти — від зниження транзакційних витрат до підвищення якості та стійкості об'єктів.

Розглянемо більш детально процес впровадження технології інформаційного моделювання будівель (BIM) у таких країнах, як Велика Британія, Данія, Німеччина, США та Польща, які сьогодні вважаються лідерами у формуванні державних політик цифрового будівництва.

Починаючи з 2010 року, у Великій Британії діє Department for Business, Innovation and Skills — урядовий департамент, який координує діяльність робочих груп, відповідальних за стандартизацію інновацій у сфері публічного будівництва. Саме під його егідою було створено BIM Industry Working Group — галузеву робочу групу, що об'єднала представників інженерного середовища, уряду, науковців та постачальників програмного забезпечення. У 2011 році ця група оприлюднила ґрунтовну доповідь [32], яка визначила стратегічний курс держави щодо впровадження методології BIM.

У документі було запропоновано концепцію «push–pull strategy», що передбачала поєднання ініціатив «зверху вниз» (через державне регулювання, стандарти та вимоги до замовників) і «знизу вгору» (через стимулювання інновацій та розвиток ринку програмних рішень).

Ключові рекомендації доповіді BIM Industry Working Group включали створення сприятливих умов для конкуренції, формування єдиних вимог до виконавців з боку замовників, розвиток системи зворотного зв'язку між ринком і державними структурами, забезпечення технічної інфраструктури для обміну даними, а також впровадження покрокової моделі переходу до BIM. Важливим акцентом стала підтримка не лише інноваційних компаній, а й малих і середніх підприємств, яким необхідна державна допомога у процесі адаптації до нових стандартів.

В основу британської моделі лягла концепція BIM Maturity Levels — рівнів зрілості використання технології, які визначають ступінь інтеграції даних і процесів у межах організації чи проекту. Починаючи від базового рівня (2D CAD) і до повноцінного спільного середовища даних (CDE), ці рівні стали орієнтиром для галузі, задаючи чіткі вимоги для досягнення кожного етапу цифрової трансформації. Розроблена стратегія передбачала створення відповідних стандартів, методичних матеріалів і навчальних програм для підготовки компаній до повномасштабного впровадження BIM [44].

Важливо, що Велика Британія підходить до розвитку BIM як до безперервного процесу — еволюційної системи, кінцевий стан якої не може бути однозначно визначеним через постійне оновлення інструментів та зміну технологічних трендів. Саме це забезпечило їй лідерські позиції серед країн, що формують національні дорожні карти цифрового будівництва. Для узагальнення еволюції впровадження BIM у Великій Британії доцільно розглянути послідовність основних етапів формування національної стратегії, ключові дії уряду та результати, що забезпечили перехід від окремих цифрових ініціатив до комплексної державної політики цифрового будівництва (табл. 3.5).

Британська модель демонструє приклад системного, поетапного впровадження BIM як державної політики, що поєднує регулювання, освіту, стандартизацію та інновації. Її досвід став методологічним зразком для багатьох країн ЄС, а також послужив базою для розробки міжнародних стандартів ISO серії 19650.

Поступовий розвиток BIM у Великій Британії відбувався за чітко структурованим планом, який передбачав послідовне формування нормативної, організаційної та технологічної бази. Замість різких реформ держава застосувала еволюційний підхід, орієнтований на довгострокову інтеграцію цифрових технологій у всі рівні будівельного процесу [111].

Таблиця 3.5.

Основні етапи та характеристики впровадження BIM у Великій Британії
(розроблено автором на основі [44])

Етап / Рік	Основні дії	Ключові результати	Рівень зрілості BIM
2010	Створення <i>Department for Business, Innovation and Skills</i>	Формування управлінської структури для координації цифрових ініціатив	Підготовчий рівень
2011	Публікація доповіді <i>BIM Industry Working Group</i> [3.30]	Визначення національної стратегії та рівнів BIM Maturity Levels	Level 1 (спільна 3D-модель)
2013–2016	Розробка національних стандартів (PAS 1192, BS 1192), навчання фахівців	Впровадження BIM у державних проєктах	Level 2 (інтеграція моделей)
2017–2020	Створення <i>Centre for Digital Built Britain</i>	Формування цифрової екосистеми будівництва, CDE-платформи	Level 3 (спільне інформаційне середовище)
2021–дотепер	Перехід до концепції <i>National Digital Twin</i>	Інтеграція BIM з системами управління інфраструктурою, сталий розвиток	Level 4 (розумні міста, аналітика життєвого циклу)

Щоб відобразити логіку впровадження цієї стратегії — від створення управлінських інституцій до переходу до національної системи цифрових близнюків — нижче подано рисунок 3.1, який демонструє ключові кроки, їхню послідовність і взаємозв'язок у межах державної політики цифровізації будівельної галузі.

Ключовим етапом еволюції цифрової трансформації у будівельній галузі Великої Британії стало офіційне рішення уряду щодо впровадження BIM Level 2 як обов'язкової вимоги для всіх державних проєктів із 2016 року. Це положення було закріплено у стратегічних документах, які визначили механізми та темпи переходу будівельного сектору до цифрових методів управління [112].

Наступним кроком стала поява урядового звіту “Infrastructure Cost: Implementation Plan”, що конкретизував шляхи практичної реалізації політики BIM. Документ окреслив низку завдань:

- створення постійного комунікаційного форуму між державними структурами та представниками будівельного сектору;
- формування галузевої робочої групи, до складу якої увійшли практики з досвідом реалізації великих проєктів;
- стимулювання інноваційності та конкурентоспроможності за рахунок поширення сучасних цифрових інструментів управління даними.

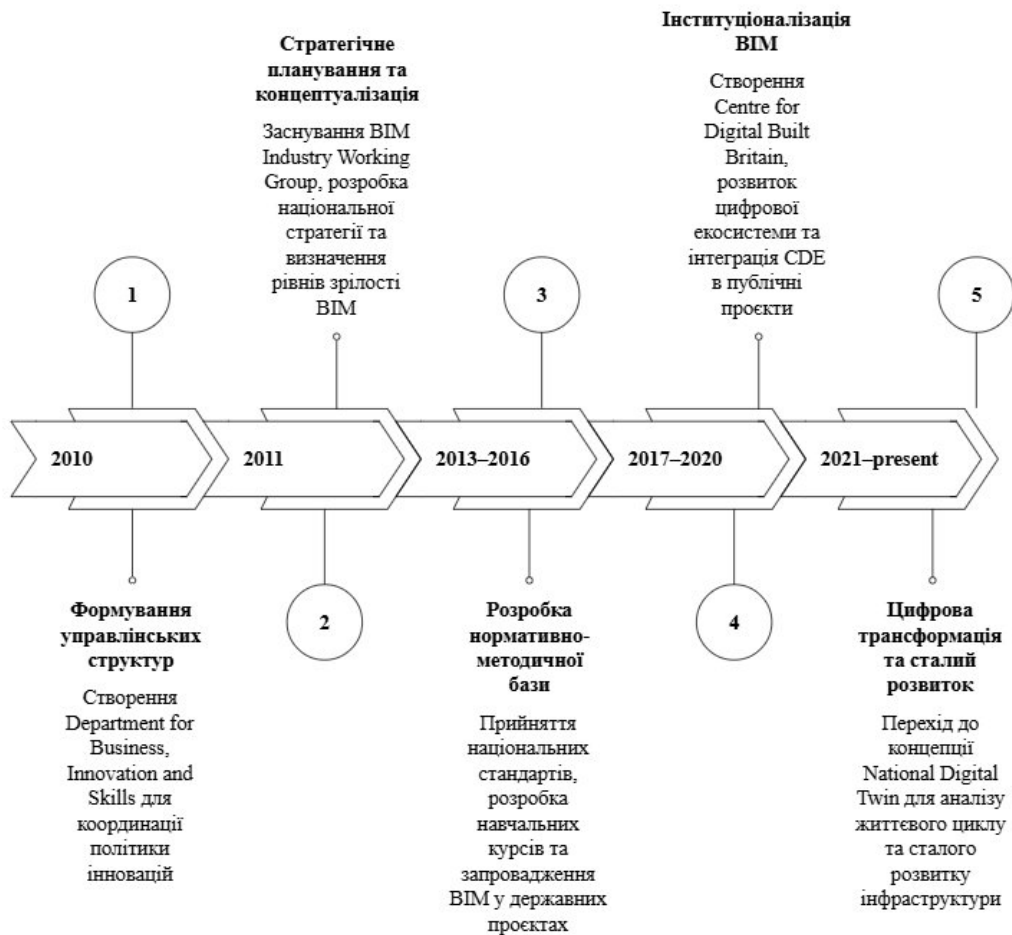


Рис. 3.6. Етапи реалізації BIM у Великій Британії
(розроблено автором на основі [112])

Визначальним документом стало затвердження у травні 2011 року Government Construction Strategy [168], яка офіційно закріпила BIM як обов'язковий компонент усіх урядових інвестицій. У межах цієї стратегії створено BIM Task Group — державну організацію, що координувала розробку стандартів співпраці, навчання персоналу та взаємодію між урядом і приватним сектором. Ця структура стала центральною ланкою у формуванні практичного механізму переходу до цифрового моделювання.

Паралельно зі впровадженням BIM було переглянуто контрактну систему державних закупівель, що дало змогу підвищити ефективність тендерних процедур, зменшити транзакційні витрати та підвищити прозорість взаємодії сторін. За результатами перших п'яти років реалізації програми британський уряд зафіксував суттєве зниження витрат на публічне будівництво.

У 2012 році вийшло оновлення Government Construction Strategy, де підбито перші підсумки впровадження BIM-моделі. Було запущено чотири пілотні проєкти з будівництва в'язниць під егідою Міністерства юстиції, де інформаційне моделювання використовувалося як базова технологія управління проєктним циклом. Уже у 2013 році з'явився документ Construction 2025, який закріпив перехід на BIM Level 2 та визначив орієнтир досягнення BIM Level 3 у період між 2016 і 2025 роками [110].

Перші результати продемонстрували економічний ефект: зокрема, під час реалізації проєкту Cookham Wood Prison витрати на проєктування та будівництво зменшилися на 18 %. Хоча у звіті прямо не зазначено, яку частку цього ефекту забезпечило використання BIM, дослідження уряду підтвердили тенденцію до скорочення вартості та строків виконання робіт у всіх пілотних програмах.

Для оцінки таких результатів у британській методології застосовувалася модель відносної ефективності цифрової трансформації, яка враховувала зміну витрат, часу та якості виконання:

$$E_{rel} = \frac{(\Delta C/C_0) + (\Delta T/T_0) + (\Delta Q/Q_0)}{3}, \quad (3.1)$$

де $\Delta C/C_0$ — частка скорочення витрат порівняно з базовим проєктом, $\Delta T/T_0$ — частка скорочення часу реалізації, $\Delta Q/Q_0$ — приріст якості у відсотках до початкового рівня.

Додатково для стратегічного аналізу впровадження використовувався індекс цифрової зрілості:

$$I_{BIM} = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i \times P_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i}, \quad (3.2)$$

де β_i — вагомість критерію (стандартизація, інтеграція, навчання, автоматизація), P_i — рівень досягнення кожного критерію у відсотках.

Як видно з оновленої стратегії розвитку Construction 2025, уряд Великої Британії не обмежується впровадженням технології BIM Level 2, а продовжує реалізовувати заходи, спрямовані на підвищення рівня цифрової зрілості будівельної галузі, розширення міжнародного співробітництва та розвиток інноваційних технологічних платформ. Наступним прикладом системного підходу до цифровізації будівництва є Данія, яка однією з перших країн Європи закріпила застосування BIM на державному рівні.

Історія розвитку інформаційного моделювання у Данії бере початок із 2006 року, коли урядом було видано спеціальне розпорядження щодо використання інформаційно-комунікаційних технологій (ICT) у будівництві. Згідно з цим нормативним актом, із 1 січня 2007 року всі нові державні інвестиційно-будівельні проєкти, що фінансувалися за рахунок бюджету, мали бути реалізовані з використанням сучасних цифрових технологій управління даними [111].

Вимоги розпорядження охоплювали не лише застосування BIM, а й комплексну цифровізацію всього процесу проєктування та реалізації. Одним із ключових пунктів стало запровадження системи ProjectWeb — інтернет-платформи, призначеної для централізованого

зберігання, обміну та контролю версій проєктної документації. Ця система забезпечувала відстеження історії змін, автоматичну публікацію оновлень та можливість формування креслень формату A3 безпосередньо на будівельному майданчику.

Значна увага приділялася підвищенню компетентності замовників. Вони мали чітко формулювати вимоги до 3D-моделей, зокрема щодо їх деталізації, якості геометричних рішень та узгодження форматів файлів. Однією з найважливіших умов було зберігання моделей у форматі Industry Foundation Classes — відкритому стандарті обміну даними, який забезпечує сумісність між різними програмними платформами BIM.

Крім того, документом визначено низку обов'язкових положень:

- опис компонентів будівлі згідно з BIPS B100 — національним стандартом, що регламентує класифікацію видів робіт та елементів конструкцій;
- розроблення попередніх планів будівництва відповідно до датської класифікації будівельних робіт;
- забезпечення відповідності між планами робіт та їхніми текстовими описами;
- гарантування повноти плану робіт — усі елементи, що мають вплив на бюджет, повинні бути відображені у кошторисі;
- чіткість і прозорість вимог, визначених у тендерній документації.

Згодом Данія розширила цю систему, розробивши методичні матеріали з цифрового управління життєвим циклом будівлі. Послідовність дій уряду Данії у сфері цифровізації будівництва мала чітку етапність і логічну структуру. Щоб наочно показати, як країна перейшла від ухвалення нормативних рішень до комплексного впровадження BIM та ICT у державні проєкти, нижче подано рисунок 3.7, який відображає основні кроки цього процесу.

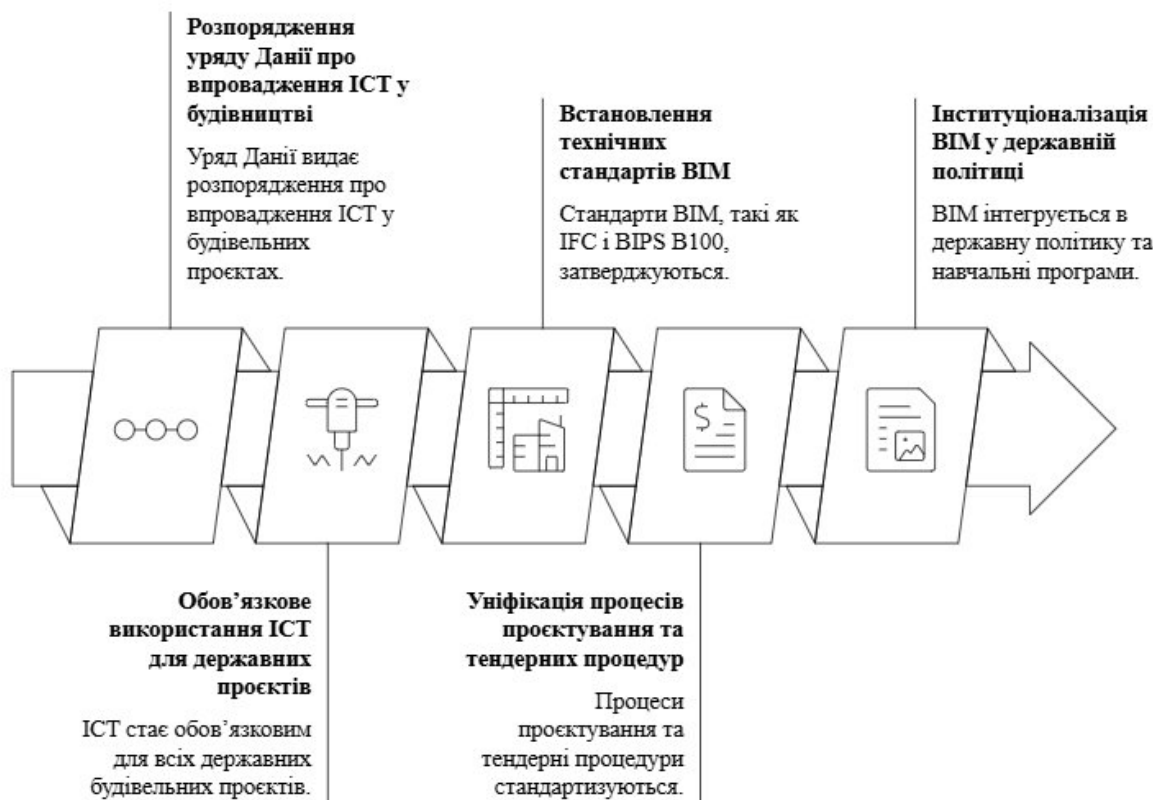


Рис. 3.7. Етапи впровадження BIM та ICT у Данії

(розроблено автором на основі [111])

Таким чином, Данія стала одним із перших прикладів системного переходу до цифрової моделі управління будівництвом, де BIM та ICT стали обов'язковими елементами державної політики. Її досвід показує, що інтеграція технологій у правову, освітню та економічну системи дозволяє створити стабільну інноваційну екосистему, яка забезпечує ефективність, прозорість і високу якість результатів.

Вагомі результати аналізу ефективності впровадження інформаційно-комунікаційних технологій (ICT) та методології BIM у будівельній галузі Данії представила компанія MT Nøjgaard — одна з провідних підрядних організацій країни, що має великий досвід у реалізації державних і комерційних інвестиційних проєктів. Дослідження компанії охоплювало 100 будівельних проєктів, виконаних у період із 2009 по 2014 роки, та було спрямоване на виявлення взаємозв'язку між рівнем цифровізації проєктної документації та якістю реалізації будівельно-монтажних робіт.

Важливо зазначити, що ініціатором дослідження виступила саме підрядна організація, тобто учасник, який безпосередньо використовує проєктну документацію у процесі виконання робіт. Це надає результатам особливої достовірності, оскільки виконавці мають практичний інтерес у забезпеченні високої якості вихідних проєктних матеріалів та мінімізації витрат, пов'язаних із доопрацюванням.

Результати аналізу показали, що 74% проєктів було розроблено із застосуванням тривимірного моделювання (3D), однак лише 61% цих моделей реально використовувався виконавцями безпосередньо на будівельному майданчику. Це свідчить про те, що в частині випадків 3D-моделі виконували переважно декларативну або демонстраційну функцію, а не ставали повноцінним інструментом управління процесом.

Дослідження також виявило, що 37% проєктів мали документацію високої якості, яка не потребувала коригувань під час реалізації. Решта проєктів — із середнім або низьким рівнем опрацювання — вимагали значних доопрацювань чи навіть повторного проєктування.

Особливо показовою є виявлена статистична залежність між використанням 3D-технологій та якістю проєктної документації. Так, серед проєктів низької якості 79% були розроблені з використанням двовимірних (2D) технологій, тоді як серед документації високої якості ця частка становила лише 15%. Отже, застосування тривимірного моделювання суттєво підвищує точність, узгодженість і практичну придатність проєктних матеріалів.

Ще одним важливим показником стала сумісність проєктів із системами ICT, що забезпечувала ефективний обмін інформацією між учасниками. Виявлено, що 77% проєктів, сумісних із ICT-рішеннями, продемонстрували високу якість документації, тоді як серед несумісних об'єктів цей показник був удвічі нижчим.

Крім того, 89% тривимірних моделей містили негеометричну (семантичну) інформацію про елементи будівлі — технічні характеристики, матеріали, варіанти монтажу, що значно підвищувало їх практичну цінність. Такий підхід фактично трансформував 3D-моделі у повноцінні інформаційні бази даних, придатні для інтеграції з кошторисними, логістичними та експлуатаційними системами.

Для забезпечення подальшого розвитку цифрового будівництва та посилення конкурентоспроможності країни на міжнародному ринку Данія з 2013 року активно працює над створенням власного національного стандарту — CCS (Cuneco Classification

System). Цей класифікатор покликаний стати не лише загальнодержавним, але й потенційно міжнародним стандартом класифікації будівельних елементів, що забезпечує уніфікацію підходів до структурування проєктної інформації [110].

Розробкою системи CCS займається компанія Cinesco, створена за участі уряду Данії, провідних підприємств будівельної індустрії та кількох європейських інноваційних фондів. Загальний бюджет проєкту на початковому етапі становив близько 12 мільйонів євро. Впровадження CCS розглядається як ключовий елемент державної програми переходу на BIM, що забезпечує єдину структуру даних для всіх учасників будівельного процесу — від проєктувальників до експлуатаційних компаній.

На відміну від бібліотек графічних компонентів, стандарт CCS не є зібранням візуальних елементів, а виступає інформаційною основою для цифрових моделей, надаючи стандартизовані коди, терміни та атрибути для всіх об'єктів будівництва. Використання CCS лише на етапі конкурсних процедур, за оцінками розробників, дозволяє скорочувати до 50% часу, необхідного для підготовки технічної документації, а також суттєво зменшує ризик помилок і дублювання даних. Таким чином, CCS створює передумови для підвищення точності, прозорості та ефективності BIM-проєктів у Данії, забезпечуючи інтеграцію між різними цифровими платформами [123].

Запровадження методології BIM у Німеччині розпочалося за ініціативою Комісії з реформ великих проєктів, створеної у 2013 році Федеральним міністерством транспорту, будівництва та розвитку міст. Причиною створення комісії стали масштабні перевищення бюджетів та зриви термінів при реалізації державних інвестиційних проєктів, таких як:

- Аеропорт Берлін-Бранденбург — перевищення бюджету на 148%;
- Залізничний вокзал у Штутгарті (Stuttgart 21) — перевищення на 54%;
- Опера в Гамбурзі (Elbphilharmonie) — затримка на 6 років, перевитрата понад 300%.

Комісія провела ґрунтовний аналіз типових проблем державного будівництва, за підсумками якого підготувала аналітичну доповідь, де систематизовано основні причини неефективності. Зокрема [47]:

- розрахунки витрат здійснювалися до створення повної проєктної документації, через що бюджети були нереалістичними;
- ігнорувалися потреби кінцевих користувачів та особливості конкретних об'єктів;
- низький рівень координації між учасниками призводив до фрагментації великих проєктів;
- будівництво часто починалося до затвердження остаточного плану, що провокувало неконтрольоване зростання вартості;
- ризики не управлялися належним чином, не передбачалися сценарії реагування на непередбачувані події;
- спостерігалася нестача кваліфікаційних компетенцій у замовників і підрядників, нечіткий розподіл відповідальності;
- тендерні процедури проводилися передчасно, без завершення проєктної документації, а відбір підрядників базувався переважно на найнижчій ціні, що спричиняло зниження якості та подальші конфлікти.

У результаті німецька будівельна галузь зіткнулася з кризою довіри, численними судовими суперечками та браком партнерства між учасниками.

Для наочності порівняємо ключові підходи Данії та Німеччини до впровадження BIM-технологій. У таблиці 3.3 узагальнено основні відмінності у причинах, механізмах та результатах цифрової трансформації будівельної галузі в цих країнах.

Таблиця 3.6.

Порівняльна характеристика підходів до впровадження BIM у Данії та Німеччині
(розроблено автором на основі [31])

Показник	Данія	Німеччина
Рік початку впровадження BIM/ICT	2006 (ICT-розпорядження), 2013 (CCS)	2013
Ключова ініціатива	Розпорядження уряду про використання ICT; створення стандарту CCS	Комісія з реформ великих проєктів
Основні причини впровадження	Необхідність уніфікації цифрових даних і підвищення ефективності проєктів	Надмірне перевищення бюджетів, затримки, низька якість управління
Основні результати	Створено CCS – національний класифікатор будівельних елементів, скорочення часу розробки проєктів до 50%	Виявлено ключові проблеми галузі, підготовлено рекомендації щодо переходу на BIM
Організаційна структура управління	Супесо – консорціум уряду, бізнесу і фондів	Федеральне міністерство транспорту, будівництва і розвитку міст
Подальший напрям розвитку	Міжнародна стандартизація класифікатора CCS, інтеграція в BIM-системи	Формування національної дорожньої карти BIM, впровадження стандартів DIN і ISO 19650

Досвід Данії та Німеччини демонструє два різні, але взаємодоповнюючі підходи: данський — превентивний, що базується на стандартизації та цифровій інтеграції, і німецький — реактивний, спрямований на усунення системних помилок через реформування процесів. Обидва приклади підтверджують, що ефективне впровадження BIM можливе лише за умов чіткої державної політики, наукової підтримки та активної участі професійного ринку.

У підсумковому звіті Комісії з реформ великих проєктів (Федеральне міністерство транспорту, будівництва та розвитку міст Німеччини) [31] було представлено десять системних рекомендацій, спрямованих на подолання кризових явищ у державному будівництві та формування нової культури управління проєктами. Ці рекомендації стали основою для подальшого впровадження BIM-методології у Німеччині та визначили напрям розвитку галузі у контексті інтеграції цифрових технологій.

Першою рекомендацією є створення партнерського середовища ще на етапі планування, коли замовник разом із майбутнім користувачем повинен чітко визначити

мету проєкту, його функціональні вимоги та критерії успіху. Такий підхід вимагає компетентності у сфері проєктування й будівництва та передбачає незалежну оцінку перед початком витрачання ресурсів.

Друга теза — «спочатку плануй, потім будуй». Жоден проєкт не повинен виходити на тендер чи реалізацію, доки не завершено розробку проєктної документації й не отримано всіх дозвільних документів. Це усуває невизначеність і мінімізує ризики корекцій після початку будівництва.

Третя рекомендація зосереджується на управлінні ризиками — їхньому виявленні, оцінюванні та включенні до інвестиційного бюджету. Кожен ризик повинен мати свою ймовірність, наслідки та механізм реагування.

Четверта — це перехід від принципу «найдешевшої пропозиції» до «найвигіднішої», що враховує не лише ціну, але й якість, методи реалізації та управлінські рішення.

П'ята рекомендація підкреслює важливість партнерства під час реалізації, формування культури довіри та відкритого обміну інформацією між усіма сторонами.

Шостий пункт стосується альтернативного врегулювання спорів — через механізми медіації та арбітражу, що дозволяє уникати затримок і судових конфліктів.

Сьома рекомендація — обов'язкове проведення аналізу окупності інвестицій (ROI) з урахуванням витрат життєвого циклу об'єкта. Для цього запроваджено формулу оцінки ефективності державного проєкту:

$$ROI_{BIM} = \frac{(S - C)}{C} \times 100\% , \quad (3.3)$$

де S — загальна економія коштів, отримана від використання BIM, C — витрати на впровадження цифрових технологій.

Восьма рекомендація зосереджена на чіткій структурі відповідальності, коли кожен учасник має визначені функції, права та терміни прийняття рішень. Це підкріплюється створенням системи управління контрактами та контролю компетенцій.

Дев'ята рекомендація — прозорість і контроль: інвестори повинні застосовувати цифрові інструменти моніторингу для контролю графіків, вартості та ресурсів. Для цього вводиться показник інтегрованого ризику:

$$R_{int} = \sum_{i=1}^n p_i \times c_i , \quad (3.4)$$

де p_i — ймовірність виникнення ризику i , c_i — його вартісний вплив.

Остання рекомендація — використання BIM як ядра цифрової системи управління, що поєднує планування, реалізацію та експлуатацію об'єктів. Вона передбачає створення єдиного інформаційного простору для всіх учасників і забезпечення аналітичної підтримки рішень на кожному етапі.

Щоб наочно продемонструвати послідовність та логіку реформ, ініційованих у Німеччині після діяльності Комісії з реформ великих проєктів, нижче наведено рисунок

3.8, який відображає основні фази переходу від аналізу проблем до впровадження національної стратегії BIM [172].



Рис. 3.8. Ключові етапи реформування системи управління великими проєктами в Німеччині (розроблено автором на основі [172])

Німецька модель переходу до BIM базується на принципах превентивного управління, системного аналізу ризиків, прозорості процесів і партнерства між усіма учасниками. У поєднанні з чіткою цифровою стратегією вона забезпечила формування цілісної екосистеми управління проєктами, орієнтованої на ефективність, якість та довіру.

Подальшим етапом у розвитку цифрової стратегії Німеччини у сфері будівництва стала доповідь Федерального міністерства транспорту та цифрової інфраструктури, у якій було детально викладено план поетапного впровадження сучасних ІТ-інструментів у процеси планування, будівництва та експлуатації об'єктів інфраструктури. Документ став практичним продовженням рекомендацій Комісії з реформ великих проєктів і визначив новий підхід до управління даними, ризиками та якістю у державному секторі.

Розробку плану реалізувала організація *planen-bauen 4.0 Gesellschaft zur Digitalisierung des Planens, Bauens und Betreibens mbH* — консорціум, створений провідними представниками німецької будівельної індустрії, до складу якого увійшли інженери, архітектори, девелопери, проектувальники, науковці та експерти з цифрових технологій. Основна мета цієї структури — забезпечити комплексну цифровізацію всіх етапів життєвого циклу будівельних об'єктів через впровадження BIM як базової моделі інтегрованого управління проєктами.

План упровадження BIM у Німеччині передбачав покрокову реалізацію у три етапи, із чіткими часовими рамками та завданнями.

- Перший етап (2015–2017 рр.) — проведення чотирьох пілотних проєктів у сфері транспортної інфраструктури, метою яких стало тестування цифрових моделей у реальних умовах, виявлення проблем інтеграції та формування методичних рекомендацій для подальшого масштабування.
- Другий етап (2017–2020 рр.) — системне розширення практики використання BIM у державних проєктах, насамперед у сфері дорожнього будівництва. Передбачалося збільшення кількості інфраструктурних об'єктів, підготовлених за допомогою BIM, а також створення галузевих стандартів обміну даними, типових контрактів та методичних посібників.
- Третій етап (з 2020 р.) — обов'язкове застосування BIM у всіх транспортних проєктах, фінансованих за державний кошт. На цьому рівні акцент робиться на інтеграції BIM із системами моніторингу експлуатаційних процесів та управління активами.

Уже в межах першої фази плану значну увагу приділено нормативно-правовим аспектам — створенню єдиної бази термінів і понять, врегулюванню юридичних питань, пов'язаних із авторськими правами, стандартизацією форм передачі даних та розробці навчальних матеріалів для державних замовників і приватних підрядників.

Важливим напрямом стало також співробітництво Міністерства транспорту з Федеральним агентством з будівництва автобанів (DEGES), яке взяло на себе реалізацію перших масштабних проєктів за новою методологією. Серед них — реконструкція автомагістралі A10/A24, що стала пілотним проєктом використання BIM у дорожньому будівництві. У ході реалізації цього об'єкта було відпрацьовано процедури взаємодії між замовником, проектувальником і підрядником у спільному цифровому середовищі даних (CDE), що забезпечило точність планування, контроль змін і скорочення термінів будівництва.

Таким чином, німецька стратегія цифрової трансформації будівельної галузі демонструє системний підхід: від пілотних ініціатив і створення галузевих стандартів до повної інтеграції BIM у державне управління інфраструктурними активами. Ця модель стала прикладом ефективної взаємодії держави та бізнесу в межах концепції «цифрового партнерства», орієнтованого на прозорість, економічну ефективність і підвищення якості інженерних рішень.

Інші фази впровадження BIM у Німеччині наразі офіційно не визначені, оскільки країна все ще перебуває на початковому етапі розгортання цифрової трансформації у будівельній галузі. Поки що сформовано лише методичну базу та запущено кілька пілотних проєктів, за результатами яких буде ухвалено рішення щодо масштабування технології. Таким чином, говорити про остаточні результати ще зарано. Водночас, подібно до британської моделі, Німеччина розглядає BIM не як окремий програмний інструмент, а як стратегічну платформу підвищення якості будівництва при одночасному скороченні витрат та мінімізації ризиків.

Сполучені Штати Америки є одним із світових лідерів у впровадженні BIM-технологій. Тут процес цифрової трансформації будівельної галузі відбувається не лише через зростання кількості компаній, які використовують BIM, а й завдяки активним науково-дослідним програмам, що оцінюють його ефективність, економічний ефект і ризики переходу на інформаційне моделювання. В США BIM розглядається як інструмент

інтегрованого управління проєктами (Integrated Project Delivery — IPD), який забезпечує одночасне підвищення якості, продуктивності та стійкості будівництва [173] використання BIM дає широкий спектр переваг:

- високу візуалізацію об'єктів у форматі 3D, що полегшує ухвалення рішень замовником;
- скорочення термінів підготовки проєктної документації;
- параметричну ув'язку елементів моделі, яка дозволяє автоматично оновлювати пов'язані частини при зміні одного параметра;
- автоматизоване виявлення та усунення колізій між конструктивними системами;
- підвищення точності календарно-ресурсного планування та кошторисних розрахунків;
- ефективне накопичення знань про проєкт і формування бази даних для подальших робіт;
- швидкий обмін інформацією між усіма учасниками процесу;
- контроль екологічних показників, вартості та термінів експлуатації.

Особливо показовими є результати досліджень McGraw-Hill Construction (2012), у яких наведено конкретні приклади економічних ефектів. Проєкт Hilton Aquarium (Атланта, Джорджія, вартість — 46 млн дол. США) показав:

- економію 600 тис. дол. США завдяки своєчасному виявленню колізій;
- зменшення трудомісткості робіт на 1 143 год, що еквівалентно економії ще 600 тис. дол. США;
- скорочення витрат на матеріали на 20%;
- загальну «чисту» економію у 200 тис. дол. США після врахування всіх витрат.

Проєкт Центру медичних наук у Колорадо (11 поверхів, бюджет 201 млн дол. США) дозволив досягти:

- скорочення кількості запитів на зміни (RFI) на 37–74% залежно від етапу;
- зменшення термінів будівництва на 2 місяці;
- зниження навантаження на команду проєкту на 50%.

Для узагальнення результатів ефективності застосування BIM у США використовується модель комплексної оцінки цифрової ефективності (Integrated BIM Performance Index — IBPI), яка поєднує технічні, часові та економічні параметри:

$$IBPI = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{WQ_i \times \Delta Q_i + WT_i \times \Delta T_i + WC_i \times \Delta C_i}{\sqrt{1 + e - (R_i + K_i \times \alpha_i)}} \right)}{n}, \quad (3.5)$$

де WQ_i, WT_i, WC_i — вагові коефіцієнти впливу якості, часу та вартості відповідно, $\Delta Q_i, \Delta T_i, \Delta C_i$ — зміни показників якості, тривалості та витрат після впровадження BIM, R_i — рівень ризику на етапі реалізації, K_i — коефіцієнт складності проєкту, α_i — ступінь цифрової інтеграції моделі.

Завдяки таким аналітичним підходам BIM у США розглядається не просто як інструмент автоматизації, а як система прийняття управлінських рішень, що дозволяє

вимірювати ефективність будівництва в кількісних показниках і формувати обґрунтовані стратегії цифрової трансформації галузі.

До середини 2010-х років у Польщі розвиток технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) мав переважно ініціативний, а не системний характер, обмежений діяльністю кількох професійних спільнот. Серед найвідоміших організацій слід назвати краківську групу «BIM Klaster», що зосереджувалася на технічних аспектах інтеграції форматів даних, насамперед стандарту IFC (Industry Foundation Classes), та товариство «BIM dla Polskiego Budownictwa», яке працювало у напрямку співпраці з державними інституціями для формування правових засад цифровізації будівельного сектору. Обидві структури заклали основу для створення міжгалузевої платформи взаємодії між науковими установами, бізнесом і державою.

Новий етап у розвитку BIM у Польщі розпочався у 2015 році, коли під час зустрічі представників семи найбільших інженерних організацій країн Вишеградської групи (V4) — Польщі, Чехії, Словаччини та Угорщини — було ухвалено рішення про створення спільної міжнародної ініціативи з упровадження BIM. На базі цих домовленостей виникла V4 BIM Task Group — експертна платформа, яка координує зусилля країн Центральної Європи у сфері стандартизації та впровадження інформаційного моделювання [146].

Основна місія V4 BIM Task Group полягає у формуванні партнерської екосистеми знань, що дозволяє накопичувати досвід, перевірений у провідних світових економіках, і адаптувати його до регіональних реалій. Група активно сприяє інтеграції BIM у державні закупівлі, підтримує створення нормативної бази, здійснює роз'яснювальну роботу та надає експертну допомогу органам влади.

До складу V4 BIM Task Group входять представники національних асоціацій інженерів, технічних університетів, науково-дослідних інститутів, а також незалежні експерти з країн ЄС. Організація працює за підтримки професійних товариств і міжнародних науково-технічних організацій, що забезпечує обмін практиками та гармонізацію стандартів.

На сьогодні ключові пріоритети V4 BIM Task Group включають:

- верифікацію міжнародних стандартів BIM і створення на їхній основі рекомендованих стандартів для країн Вишеградської групи;
- налагодження співпраці з урядовими структурами для підтримки державних проєктів;
- участь у підготовці нормативно-правових актів щодо цифровізації будівництва;
- підтримку реалізації пілотних проєктів BIM у державному секторі;
- створення постійної експертної структури, яка забезпечуватиме консалтинг і методичну допомогу при держзамовленнях.

Для узагальнення основних напрямів розвитку BIM у Польщі та країнах Вишеградської групи, а також для порівняння рівня державної підтримки, організаційної структури та досягнутих результатів, нижче наведено таблицю 3.7.

Варто відзначити, що європейський контекст розвитку BIM показує різні моделі його інтеграції: від централізованих державних стратегій (як у Великобританії чи Скандинавії) до міждержавних партнерських програм, характерних для Центральної Європи. Польща обрала коопераційну модель розвитку, що дозволяє обмінюватися

знаннями, уникати дублювання зусиль і прискорювати гармонізацію цифрових стандартів.

Таблиця 3.7.

Порівняльна характеристика розвитку BIM у Польщі та країнах Вишеградської групи (розроблено автором на основі [146])

Країна	Ключові організації	Основний напрям діяльності	Рівень державної підтримки	Поточні результати
Польща	BIM Klaster, BIM dla Polskiego Budownictwa	Технічна інтеграція форматів IFC, співпраця з урядом	Середній	Створення національних рекомендацій, участь у V4 BIM Task Group
Чехія	CzBIM, ŠKAIT	Освітні програми, створення національної дорожньої карти BIM	Високий	BIM включено до державних тендерів із 2023 року
Словаччина	BIMaS	Академічна підтримка та стандартизація класифікацій	Середній	Розробка власного класифікатора BIM
Угорщина	HUGBC, Lechner Knowledge Center	Сталий розвиток і цифрові будівельні дані	Високий	Запуск державної платформи BIM Data Hub
V4 BIM Task Group	Консорціум V4	Координація, стандартизація, підтримка держзамовлень	Високий (міждержавна ініціатива)	Формування спільних рекомендацій і створення єдиного BIM-кодування для регіону

Польща поступово переходить від локальних ініціатив до інституційного рівня управління цифровою трансформацією будівельної галузі. Через співпрацю у межах V4 BIM Task Group країна отримує доступ до найкращих європейських практик, що сприяє розробці власної BIM-стратегії та підвищенню конкурентоспроможності на міжнародному ринку.

3.3. Когнітивні переваги інформаційного моделювання як інструменту управління знаннями

Впровадження технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) у світі демонструє стале зростання, охоплюючи дедалі ширше коло країн і галузей. У більшості розвинених держав цей процес відбувається за активної участі державних інституцій, які

виступають ініціаторами цифровізації та забезпечують нормативну підтримку. В Україні ж діджиталізація будівельного комплексу перебуває лише на початковій стадії. Інтерес до BIM-технологій виявляють переважно окремі приватні підприємства, проєктні бюро та розробники програмного забезпечення, тоді як державна політика у цьому напрямку досі не має системного характеру.

На сьогодні вітчизняний досвід упровадження BIM є фрагментарним та переважно локалізованим у межах окремих компаній або освітніх ініціатив. Відсутність єдиних стандартів, централізованого управління та законодавчих стимулів гальмує розвиток національної цифрової стратегії в будівництві. Незважаючи на це, низка університетів і технічних шкіл України почала включати основи BIM у навчальні програми, що є важливим кроком до підготовки кваліфікованих фахівців нового покоління [374].

Інформаційне моделювання розглядається як комплексна методологія управління життєвим циклом будівлі, яка передбачає збір, обробку, зберігання й аналіз усіх даних про об'єкт у єдиному цифровому середовищі. У межах цього підходу будівля розглядається не просто як набір креслень чи технічних характеристик, а як динамічна інформаційна система, де кожен елемент пов'язаний із технологічними, конструктивними, економічними та експлуатаційними параметрами.

Для кількісної оцінки ефективності впровадження BIM у національному контексті можна застосувати модель цифрової зрілості галузі (Digital Maturity Model – DMM), що дозволяє врахувати технічні, організаційні та людські чинники розвитку:

$$DMM_{BIM} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(W_i \times \sqrt{T_i^2 + O_i^2 + H_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad (3.6)$$

де W_i – ваговий коефіцієнт показника, T_i – рівень технологічної готовності, O_i – рівень організаційної підтримки, H_i – кваліфікація людського капіталу.

Крім того, економічну доцільність переходу на BIM можна визначити за допомогою інтегрального коефіцієнта економічного ефекту (E_{int}), що враховує зміну витрат і термінів реалізації:

$$E_{int} = \frac{(\Delta C/C_0) + (\Delta T/T_0) + (\Delta Q/Q_0)}{3} \times \frac{1}{1 + e^{-kR}}, \quad (3.7)$$

де $\Delta C/C_0$, $\Delta T/T_0$, $\Delta Q/Q_0$ — відносні зміни вартості, тривалості та якості, R — коефіцієнт ризику впровадження, k — показник чутливості системи до ризику.

У перспективі Україна має всі передумови для масштабного розвитку BIM — потужну інженерну школу, активну IT-спільноту та зростаючий інтерес бізнесу до цифрових технологій. Проте для ефективного прогресу необхідно створити державну стратегію цифрової трансформації будівництва, узгоджену з європейськими стандартами ISO 19650 та DIN SPEC 91391 [126].

Для систематизації поточного стану розвитку BIM-технологій в Україні, визначення ключових проблем та окреслення перспектив подальшого впровадження, нижче наведено таблицю 3.8.

Таблиця. 3.8.

Поточний стан та перспективи впровадження BIM в Україні
(розроблено автором на основі [3.42])

Критерій	Поточний стан	Проблеми	Перспективи розвитку
Нормативна база	Відсутня єдина державна стратегія BIM	Немає стандартів і законодавчих вимог	Розробка національної дорожньої карти BIM
Освіта і кадри	Окремі курси у ВНЗ	Недостатня кількість спеціалістів	Створення освітніх програм і сертифікацій
Технологічна інфраструктура	Локальне впровадження у приватному секторі	Висока вартість ліцензій і відсутність інтегрованих платформ	Розвиток відкритих рішень на основі IFC та CDE
Інституційна підтримка	Відсутня централізована координація	Недостатня участь держави	Створення Національного центру BIM
Економічний ефект	Часткові локальні результати	Відсутність системних досліджень	Очікуване зниження витрат на 10–20% при впровадженні BIM

Подальше впровадження BIM в Україні залежить від переходу від точкових ініціатив до національної цифрової стратегії, що інтегрує технологічні, нормативні та освітні чинники. Реалізація такого підходу забезпечить не лише підвищення ефективності галузі, а й інтеграцію України в європейський цифровий будівельний простір.

На основі аналізу сучасних наукових праць і нормативних джерел можна визначити ключові концептуальні засади інформаційного моделювання будівель (BIM), які відображають його сутність як цілісної методології управління даними на всіх етапах життєвого циклу об'єкта. Реалізація цих засад створює передумови для повноцінного використання потенціалу цифрових технологій у проєктуванні, будівництві та експлуатації [98].

По-перше, інформаційна модель будівлі повинна містити структуровані дані, придатні для автоматизованої обробки, інтеграції та передачі між різними програмними системами. Такі дані формують основу для аналітики, управління ризиками та оптимізації витрат.

По-друге, інформація в BIM-моделі має бути достовірною і синхронізованою з реальним станом об'єкта. Усі зміни, що відбуваються під час будівництва або експлуатації, повинні миттєво відображатися у цифровій моделі, забезпечуючи її актуальність і відповідність реальності.

Третій принцип полягає у неперервності підтримки моделі протягом усього життєвого циклу будівлі — від концепції і проектування до утилізації. Це означає, що модель не завершує своє існування після здачі об'єкта в експлуатацію, а слугує базою даних для управління технічним обслуговуванням і реконструкціями.

Наступна засада — незалежність моделі від конкретного програмного забезпечення, що забезпечується завдяки інтеропераційності — можливості обміну даними між різними платформами. Це гарантує стабільність цифрової екосистеми, уникнення «замикання» користувачів на окремих вендорах і полегшує державне впровадження BIM.

П'ята концепція полягає у створенні єдиного середовища співпраці (CDE), де вся інформація доступна всім учасникам інвестиційно-будівельного процесу — від архітекторів до експлуатуючих організацій. Така модель формує прозоре, інтегроване та командне середовище роботи.

Нарешті, кожен елемент моделі повинен містити повний набір метаданих про своє походження, функціонування, технічні характеристики та строки обслуговування. Це перетворює BIM-модель із набору креслень у динамічну базу знань, що забезпечує аналітичну підтримку управлінських рішень.

Незважаючи на порівняно високу вартість впровадження, BIM-технології мають значний потенціал для модернізації будівельної галузі, оскільки поєднують автоматизацію, точність, енергоефективність та сталий розвиток. Серед ключових тенденцій, що стимулюють їх розвиток, можна виділити [284]:

- активізацію реалізації великих інфраструктурних проєктів;
- зростання попиту на «зелене» будівництво та енергоощадні рішення;
- розвиток цифрових платформ управління міською інфраструктурою й об'єктами державної власності;
- розширення практики державно-приватного партнерства.

Щоб узагальнити основні принципи та логіку функціонування концепції інформаційного моделювання будівель, нижче подано рисунок 3.4, який відображає ключові етапи формування, підтримки та використання цифрової моделі в межах життєвого циклу об'єкта.

Концепція BIM виступає не лише технологією проєктування, а філософією управління інформацією, яка інтегрує проєктно-будівельну, експлуатаційну та аналітичну складові в єдину цифрову екосистему, забезпечуючи підвищення ефективності, прозорості та якості будівельних процесів.

Використання інформаційного моделювання будівель (BIM) відкриває низку істотних переваг порівняно з традиційними методами архітектурно-будівельного проєктування [20]. Головна відмінність цієї технології полягає у тому, що вона дозволяє створити цілісну цифрову модель об'єкта, у якій об'єднано як геометричні параметри, так і технічні, економічні, технологічні та експлуатаційні характеристики. Така модель виступає не лише кресленням або візуалізацією, а повноцінною базою даних про об'єкт, що охоплює весь його життєвий цикл — від концепції до демонтажу.

BIM-технології надають можливість у віртуальному середовищі змодельовати процес будівництва, здійснити підбір конструктивних рішень, провести розрахунки навантажень, проаналізувати взаємодію різних систем і навіть передбачити можливі колізії до початку реального будівництва. Такий підхід дозволяє зменшити кількість помилок, знизити ризик проєктних неузгоджень і оптимізувати витрати на етапі реалізації.

Принципи BIM



Рис. 3.9. Цільові засади концепції інформаційного моделювання (BIM)
(розроблено автором на основі [284])

На відміну від класичних CAD-систем, які зосереджені лише на створенні геометричних моделей, BIM формує інформаційно-аналітичне середовище, де кожен елемент має набір атрибутів — матеріал, вартість, енергоспоживання, термін служби тощо. Це дає змогу не тільки будувати об'єкт у цифровому форматі, а й моделювати його поведінку в реальних умовах експлуатації, прогнозувати витрати на утримання, оцінювати екологічні показники та енергоефективність.

Ще однією важливою перевагою є можливість спільної роботи різних учасників проєкту в єдиному інформаційному середовищі (CDE – Common Data Environment). Інженери, архітектори, кошторисники, підрядники та замовники працюють із єдиною актуальною моделлю, що усуває ризики втрати або дублювання даних. Усі зміни в моделі

автоматично синхронізуються, забезпечуючи прозорість та оперативність ухвалення рішень.

Крім того, BIM забезпечує автоматизацію процесів документування — усі креслення, специфікації, кошториси та графіки будівництва генеруються безпосередньо з моделі, що гарантує їх відповідність реальному стану проєкту. Завдяки цьому знижується трудомісткість оформлення документації, а також підвищується точність розрахунків і планування.

Важливо й те, що BIM надає можливість створювати мультидисциплінарні моделі, у яких об'єднуються архітектурні, конструктивні, технологічні, інженерні та фінансові аспекти будівництва. Така інтеграція сприяє підвищенню ефективності управління як на стадії проєктування, так і під час експлуатації будівлі.

Отже, застосування BIM формує нову парадигму проєктного мислення — перехід від статичних креслень до динамічних, інформаційно насичених моделей, які стають інструментом стратегічного планування, контролю та оптимізації будівельних процесів. Це дозволяє не лише підвищити якість і точність проєктів, а й суттєво знизити часові та фінансові витрати, забезпечуючи прозорість і керованість усього життєвого циклу об'єкта.

Переваги використання технології BIM (Building Information Modeling) у сучасному будівництві стають особливо очевидними в умовах цифрової трансформації проєктного процесу. Ця технологія дозволяє створювати не лише геометричну модель споруди, а динамічний інформаційний простір, у якому зосереджено всі дані про будівлю, її конструкцію, інженерні системи та експлуатаційні характеристики.

BIM дає змогу моделювати зміни у конструктивних рішеннях, прогнозувати реакцію споруди на різні експлуатаційні навантаження, планувати переоснащення об'єкта сучасним інженерним обладнанням і доводити технічний рівень до актуальних стандартів енергоефективності та безпеки. Цифрова модель також забезпечує постійний моніторинг стану будівлі, що дозволяє завчасно виявляти потребу в ремонті або реставрації.

Завдяки автоматизації процесів час проєктування для типових об'єктів скорочується на 30–50%, а внесення змін у проєктну документацію відбувається без потреби повторного моделювання. Крім того, BIM суттєво знижує кількість конфліктів між системами будівлі, підвищує точність техніко-економічних розрахунків і забезпечує накопичення корпоративних знань, що можуть бути використані при наступних проєктах.

Учасники проєктного процесу — архітектори, інженери, конструктори, замовники — отримують доступ до єдиного джерела правдивої інформації, що сприяє узгодженості рішень, ефективній взаємодії та оптимізації витрат. Крім того, BIM сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище, адже дозволяє точніше прогнозувати споживання ресурсів і зменшувати відходи.

На етапі проєктування BIM відкриває можливість для інтегрованого підходу:

- забезпечується автоматичне виявлення колізій між інженерними системами;
- планується оптимальне розміщення соціальної інфраструктури з урахуванням існуючих комунікацій;
- здійснюється цифрове моделювання рельєфу, транспортної та енергетичної мережі;
- оптимізуються маршрути постачання матеріалів та розраховується потреба у техніці й персоналі.

Для кількісної оцінки ефективності впровадження BIM у процес проєктування використовується індекс інтегрованої ефективності (ІІЕ):

$$PIE = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha_i \times (Q_i - Q_{0i})}{Q_{0i}} + \frac{\beta_i \times (C_{0i} - C_i)}{C_{0i}} + \frac{\gamma_i \times (T_{0i} - T_i)}{T_{0i}} \right)}{n}, \quad (3.8)$$

де Q_i — якісні показники результату, C_i — вартість робіт, T_i — час виконання, а $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ — вагові коефіцієнти впливу кожного параметра.

Додатково для моделювання енергоефективності та експлуатаційної стійкості будівлі застосовується коефіцієнт екологічної інтеграції (EI):

$$EI = \frac{\int_0^t (E_s - E_c) \times e^{-k\tau} d\tau}{E_0}, \quad (3.9)$$

де E_s — енергозбереження, E_c — енергоспоживання, E_0 — базовий рівень споживання, k — коефіцієнт втрат енергоефективності з часом.

Для узагальнення основних можливостей і переваг використання технології BIM на різних етапах життєвого циклу об'єкта будівництва, нижче подано таблицю 3.9, яка відображає ключові ефекти впровадження цієї технології від проектування до експлуатації та модернізації споруд.

Технологія BIM створює нову парадигму управління життєвим циклом будівлі, у якій поєднуються точність, швидкість і системність. Її впровадження забезпечує перехід від фрагментованих процесів до інтелектуально керованого будівництва, орієнтованого на ефективність, сталість та інноваційність.

Таблиця 3.9.

Основні переваги BIM на різних етапах життєвого циклу об'єкта
(розроблено автором на основі [145])

Етап життєвого циклу	Основні переваги використання BIM	Очікуваний ефект
Проектування	Автоматичне виявлення колізій, 3D-візуалізація, інтеграція геоданих	Скорочення термінів на 30–50%, підвищення точності документації
Будівництво	Цифрове керування графіками робіт, моделювання процесів, координація підрядників	Зменшення витрат на 15–25%, зниження кількості помилок
Експлуатація	Моніторинг технічного стану, планування ремонту, управління енергією	Підвищення довговічності об'єктів, економія ресурсів
Модернізація та утилізація	Віртуальне моделювання реконструкцій, прогноз екологічного впливу	Зменшення відходів, повторне використання матеріалів

На етапі будівництва застосування технології BIM (Building Information Modeling) відкриває нові можливості для комплексного управління процесами та ресурсами. За допомогою цифрової моделі стає можливим відстеження фактичного стану виконання робіт, контроль фінансових потоків і дотримання бюджетів, а також формування аналітичної управлінської інформації в режимі реального часу. Це дозволяє керівникам проєктів оперативно ухвалювати рішення, порівнюючи заплановані показники з реальними результатами, що значно підвищує ефективність управління.

BIM на етапі реалізації дає змогу інтегрувати тривимірну інформаційну модель споруди з календарним планом виконання робіт (4D-моделювання), поєднуючи просторові, часові та ресурсні параметри. Такий підхід забезпечує прозору координацію дій між підрядниками, субпідрядниками та постачальниками. Кожен етап будівництва може бути змодельований заздалегідь, що дозволяє оцінити вплив змін на терміни, вартість і технологічну послідовність [145].

Для забезпечення повного циклу управління використовуються спеціалізовані програмні комплекси, які охоплюють різні сфери діяльності: планування будівництва, управління земляними роботами, моніторинг логістики, контроль матеріальних запасів і використання техніки. Частина таких рішень працює як самостійні модулі, але більшість інтегрується безпосередньо з BIM-моделлю, створюючи єдину інформаційну систему управління будівельним майданчиком.

На етапі експлуатації цифрова модель перетворюється на BIM-FM (Facility Management) — систему управління об'єктом у післябудівельний період. Вона забезпечує:

- ведення й оновлення експлуатаційної документації;
- облік обладнання та контроль виконання гарантійних зобов'язань;
- моніторинг споживання ресурсів (води, електроенергії, тепла, холоду);
- управління інженерною та інформаційною інфраструктурою;
- інтеграцію з BMS (Building Management System) — автоматизованими системами керування будівлею.

У період управління нерухомістю (Property Management) BIM стає стратегічним інструментом для власників та експлуатуючих компаній. Система дозволяє здійснювати технічне обслуговування, проводити планові та регламентні ремонти, оцінювати енергоефективність та фінансову результативність експлуатації. Крім того, BIM підтримує [27]:

- аудит технічного стану та інвентаризацію обладнання;
- планування річного бюджету на утримання об'єкта;
- маркетингову та консалтингову аналітику щодо управління активами;
- розроблення стратегічних планів модернізації будівлі та управління життєвим циклом.

Таким чином, BIM виступає не лише як технологія проєктування, а як інтегрована система управління активами, що охоплює увесь цикл від будівництва до експлуатації та реконструкції. Її впровадження забезпечує підвищення ефективності, скорочення витрат і створює основу для цифрового моніторингу нерухомості у реальному часі, що є фундаментом концепції «розумного міста» та сталого будівництва [27].

Щоб узагальнити переваги, які отримують різні учасники інвестиційно-будівельного процесу при впровадженні технології BIM, нижче наведено рисунок 3.10, що

демонструє специфічні вигоди для виконавців, інвесторів, проєктантів та управляючих компаній у контексті цифрової трансформації будівельної галузі.

Переваги цифрової трансформації в будівництві

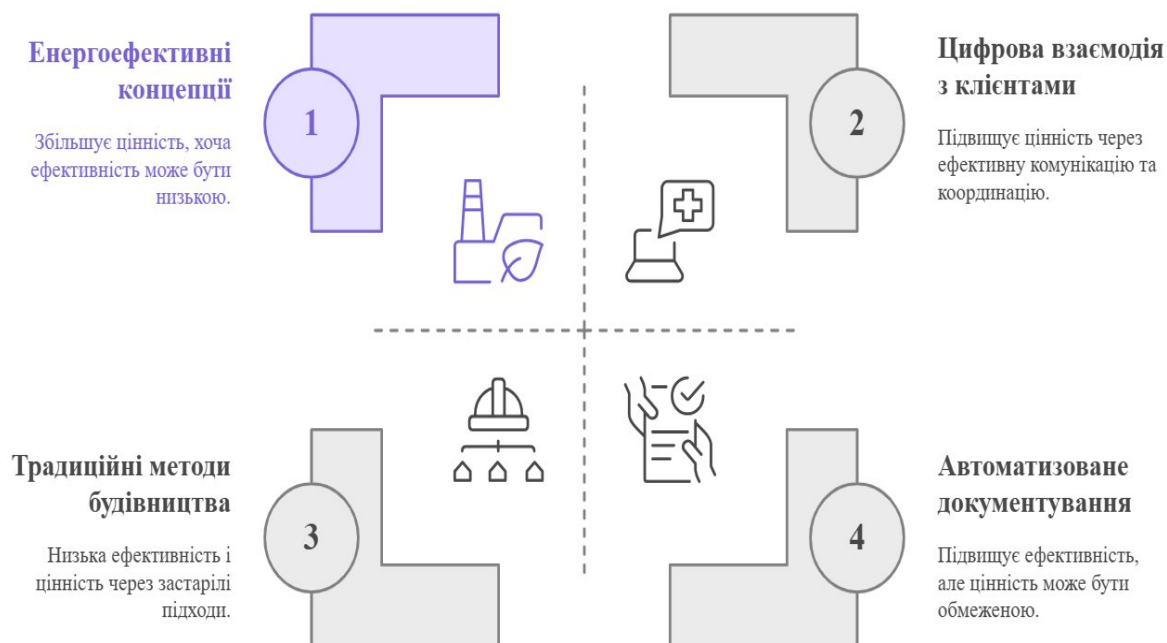


Рис.3.10. Конкурентні переваги учасників реалізації проєкту при впровадженні BIM (розроблено автором на основі [27])

Для систематизації основних вигод, які отримують різні сторони в процесі реалізації будівельних проєктів при впровадженні технології інформаційного моделювання, нижче подано рисунок 3.11, що відображає специфічні результати та ефекти для замовників, проєктантів, виконавців і управляючих структур [116].

На думку провідних фахівців у сфері інформаційного моделювання, незважаючи на численні переваги BIM-технологій, їхнє впровадження супроводжується низкою організаційних, технічних та економічних обмежень, які суттєво впливають на ефективність реалізації будівельних проєктів.

Одним із ключових викликів є необхідність високого рівня співпраці між усіма учасниками проєкту. Ефективність BIM безпосередньо залежить від ступеня залучення проєктної команди в єдиний цифровий процес. Максимізація вигод можлива лише за умов, коли замовники, проєктанти, інженери та виконавці спільно працюють у єдиному інформаційному середовищі, обмінюючись даними у режимі реального часу. Відсутність належної комунікації або неповне залучення будь-якої сторони призводить до втрати потенційних переваг.

Іншою важливою проблемою залишається обмежена сумісність програмних рішень і недостатній рівень цифрової грамотності фахівців. Команди часто працюють у різних програмних середовищах, що ускладнює обмін моделями та даними. Помилки при

передачі файлів IFC, втрати інформації або невідповідність форматів можуть зумовити повторну роботу, затримки і додаткові витрати [42].



Рис. 3.11. Переваги, які отримують учасники будівельного проєкту в результаті впровадження технології BIM (розроблено автором на основі [41])

Крім того, впровадження BIM вимагає фокусування уваги на найбільш ризикових і витратних ділянках будівництва, що потребує достовірних джерел даних і глибокого аналітичного підходу. Невірна оцінка ризиків або недостатня кількість перевіреної інформації може призвести до фінансових втрат.

З практичної точки зору, ефективне використання BIM можливе лише у разі, коли проєктна документація розробляється колегіально всіма учасниками процесу, з дотриманням принципів прозорості, узгодженості та стандартизації.

Водночас фахівці виокремлюють низку бар'єрів, які гальмують широке впровадження технології. Серед них [114]:

- побоювання щодо недостатнього економічного ефекту або його відсутності;
- високі початкові інвестиції у ліцензоване ПЗ та навчання персоналу;
- брак часу для оволодіння новими інструментами;
- консервативне мислення керівників підприємств і спротив змінам;
- нерегульованість нормативно-правової бази щодо BIM;
- низька готовність інвесторів фінансувати створення цифрових моделей, корисних у подальшій експлуатації;
- традиційність галузі, що характеризується інертністю та недостатнім розумінням цифрових переваг;
- асиметрія ризиків і вигод між учасниками проєкту;
- відсутність стандартизованих контрактних і бізнес-моделей, що ускладнює формування наскрізних процесів BIM.

Для узагальнення ключових факторів, що стримують ефективне впровадження технології BIM у будівельній галузі, нижче наведено таблицю 3.10, у якій систематизовано організаційні, технічні, економічні, нормативні та інституційні аспекти, що впливають на темпи цифрової трансформації галузі [114].

Таблиця 3.10.

Основні обмеження та бар'єри впровадження BIM у будівельних проєктах
(розроблено автором на основі [114])

№	Група обмежень	Суть проблеми	Потенційний вплив
1	Організаційні	Недостатній рівень співпраці між учасниками, відсутність єдиного цифрового середовища	Зниження ефективності реалізації проєктів, збільшення термінів
2	Технічні	Несумісність ПЗ, втрата даних при обміні моделями, недостатня цифрова підготовка	Помилки в документації, повторне моделювання, додаткові витрати
3	Економічні	Високі витрати на програмне забезпечення, навчання та технічну підтримку	Уповільнення впровадження BIM у малих компаніях
4	Нормативно-правові	Відсутність державних стандартів і регламентів використання BIM	Відсутність офіційного статусу інформаційних моделей у будівництві
5	Психологічні та культурні	Консерватизм керівництва, побоювання змін, низький рівень довіри до цифрових технологій	Гальмування інновацій, обмеження потенціалу цифрової трансформації

6	Інституційні	Неврегульованість бізнес- та контрактних моделей, асиметричність вигод	Відсутність інтегрованого підходу до управління проєктами

Обмеження у впровадженні BIM мають комплексний характер і охоплюють організаційно-технологічну, економічну та нормативну сфери. Для їх подолання необхідні системні заходи: розвиток національних стандартів, навчання кадрів, створення правових основ для цифрового проєктування та стимулювання міжгалузевої кооперації.

Цінність застосування технології інформаційного моделювання будівель (BIM) у сучасному будівництві виходить далеко за межі суто технологічних чи організаційних переваг. Йдеться не лише про підвищення ефективності окремих проєктів, а про створення довгострокової системної цінності, яка формується через накопичення, збереження та повторне використання знань, отриманих у процесі реалізації BIM-проєктів. Таким чином, кожен новий проєкт, виконаний із використанням BIM, не лише генерує локальні вигоди, а й збагачує цифровий інтелект галузі, формуючи базу даних, яка може бути застосована для майбутніх ініціатив.

Вторинна або кумулятивна цінність BIM накопичується на всіх етапах життєвого циклу об'єкта — від концептуального проєктування до технічного обслуговування й експлуатації. На стадії проєктування це — оптимізація архітектурних і конструктивних рішень; під час будівництва — зменшення кількості помилок, економія ресурсів та точна координація; на етапі експлуатації — цифровий моніторинг, прогнозування витрат і підтримка прийняття управлінських рішень. Так, BIM виступає не лише як інструмент, а як механізм стратегічного управління знаннями у будівельній сфері, який формує цінність у довгостроковій перспективі.

У практичному вимірі одним із найбільш складних питань залишається оцінка комерційної цінності та економічної ефективності впровадження BIM. Попри зростання кількості досліджень і методичних підходів, на сьогодні не існує універсальної моделі, що дозволяла б точно визначати рівень економічної віддачі від впровадження цифрових інновацій. Основна причина полягає у недостатній кількості достовірних даних щодо реальних витрат, прямих і непрямих вигод, а також у складності вимірювання нематеріальних ефектів — підвищення якості, швидкості комунікацій чи зниження ризиків [138].

Для наочного відображення механізму формування комерційної та стратегічної цінності технології BIM у будівництві, нижче наведено рисунок 3.12, який демонструє послідовність створення доданої вартості від проєктування до експлуатації та управління знаннями.

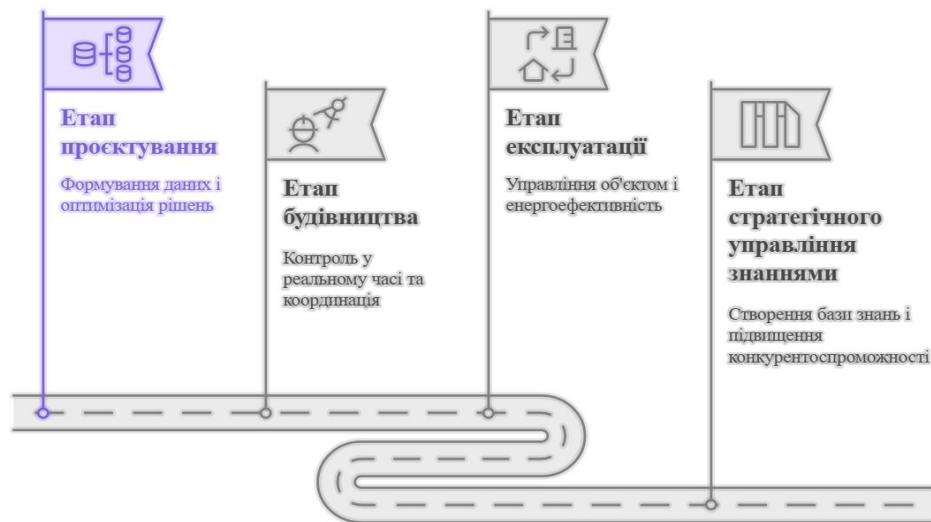


Рис. 3.12. Етапи формування цінності BIM у будівельних проєктах
(розроблено автором на основі [139])

Проблема визначення економічного ефекту від впровадження BIM залишається однією з найактуальніших у теорії та практиці інноваційного менеджменту. Адже для прийняття управлінського рішення необхідно мати обґрунтований прогноз доходів, витрат і ризиків, пов'язаних із впровадженням нової технології. Наявність достовірної аналітики дозволяє сформувати впевненість у досягненні очікуваного результату, що, у свою чергу, стимулює інвестиційну активність у цифровізацію будівельної галузі. Прогнозований позитивний фінансовий результат є ключовим мотиватором для переходу компаній до BIM і створення цифрових стратегій сталого розвитку.

3.4. Оцінювання ефектів інтеграції методів IPD (Integrated Project Delivery) та BIM у єдину когнітивну модель

Сучасна будівельна галузь перебуває у стані структурної трансформації, коли цифрові технології, аналітичні моделі та системи спільного управління проєктами формують нову парадигму ефективності. У цьому контексті інтеграція методологій IPD (Integrated Project Delivery) та BIM (Building Information Modeling) набуває ключового значення, оскільки дозволяє поєднати інформаційні, управлінські та когнітивні аспекти життєвого циклу проєкту в єдину логічну систему. Якщо BIM виступає цифровим ядром технічного моделювання, то IPD створює організаційно-комунікативне середовище, яке забезпечує спільне прийняття рішень, інтеграцію учасників і синхронізацію процесів. Об'єднання цих двох підходів відкриває можливість побудови когнітивної моделі, де інформація, досвід і управлінські наміри зливаються в єдину інтелектуальну систему управління проєктом.

Когнітивна природа такої інтеграції полягає у створенні багаторівневого простору, в якому дані BIM стають не лише джерелом технічної інформації, а й засобом формування управлінських знань. IPD, у свою чергу, забезпечує комунікативну рамку, що трансформує ці знання у колективні рішення. У процесі інтеграції виникає когнітивна синергія — коли цифрова модель проєкту не лише візуалізує об'єкт, а й слугує інструментом прогнозування, навчання, аналізу ризиків і координації між учасниками. Це

створює умови для зменшення конфліктів, скорочення витрат, підвищення передбачуваності результатів і якості управління [142].

Інтегрована когнітивна модель IPD–BIM має декілька ключових характеристик. По-перше, вона функціонує як єдина інформаційно-управлінська екосистема, у якій усі дані, процеси та рішення взаємопов'язані. По-друге, вона базується на принципі колективного інтелекту, що дозволяє різним учасникам (архітекторам, інженерам, замовникам, підрядникам) не лише обмінюватися даними, а й формувати спільні когнітивні структури сприйняття проєкту. По-третє, така модель підтримує зворотний зв'язок між рішеннями та результатами, що забезпечує постійне навчання системи. Таким чином, у поєднанні IPD і BIM формується когнітивна архітектура, здатна адаптуватися, самовдосконалюватися й прогнозувати наслідки управлінських дій.

Побудова когнітивної моделі інтеграції методів IPD та BIM потребує чіткого відображення логіки взаємодії між технічними, управлінськими та аналітичними компонентами проєкту. Щоб продемонструвати, як відбувається трансформація інформаційних потоків у знання та рішення, доцільно подати процес у вигляді структурної послідовності. Така схема відображає шлях від первинного збору даних до формування єдиної когнітивної системи управління, де кожен етап забезпечує перехід від цифрової фіксації об'єкта до аналітичної інтерпретації та зворотного зв'язку. Нижче наведений рисунок 3.13, який узагальнює логіку когнітивної інтеграції IPD та BIM у межах єдиної моделі.

Інтеграція IPD та BIM у межах когнітивної моделі має стратегічний ефект для всього життєвого циклу будівельного проєкту. Поєднання інформаційної точності BIM із колективним механізмом прийняття рішень IPD створює новий тип середовища — когнітивно-аналітичне управління, у якому проєкт постає як самонавчальна система. У цій системі кожен учасник не лише споживає інформацію, а й впливає на формування знань через власні рішення, що миттєво оновлюються у цифровій моделі. У результаті проєкт функціонує як замкнене когнітивне коло, де помилки не накопичуються, а перетворюються на навчальні сигнали для подальшої оптимізації.

Ключовим ефектом такої інтеграції є зростання когнітивної прозорості управління. Це означає, що всі учасники мають однаковий доступ до структурованих даних і бачать не лише стан системи, а й логіку ухвалених рішень. Прозорість підвищує довіру між сторонами, зменшує ймовірність дублювання або конфліктів, прискорює процес узгодження завдань. Одночасно когнітивна взаємодія сприяє формуванню спільної інтелектуальної відповідальності — кожне рішення приймається не окремо, а у контексті колективної мети. Таким чином, ефективність управління підвищується не лише завдяки цифровим технологіям, а й завдяки когнітивному узгодженню мотивацій, знань і цінностей усіх учасників.

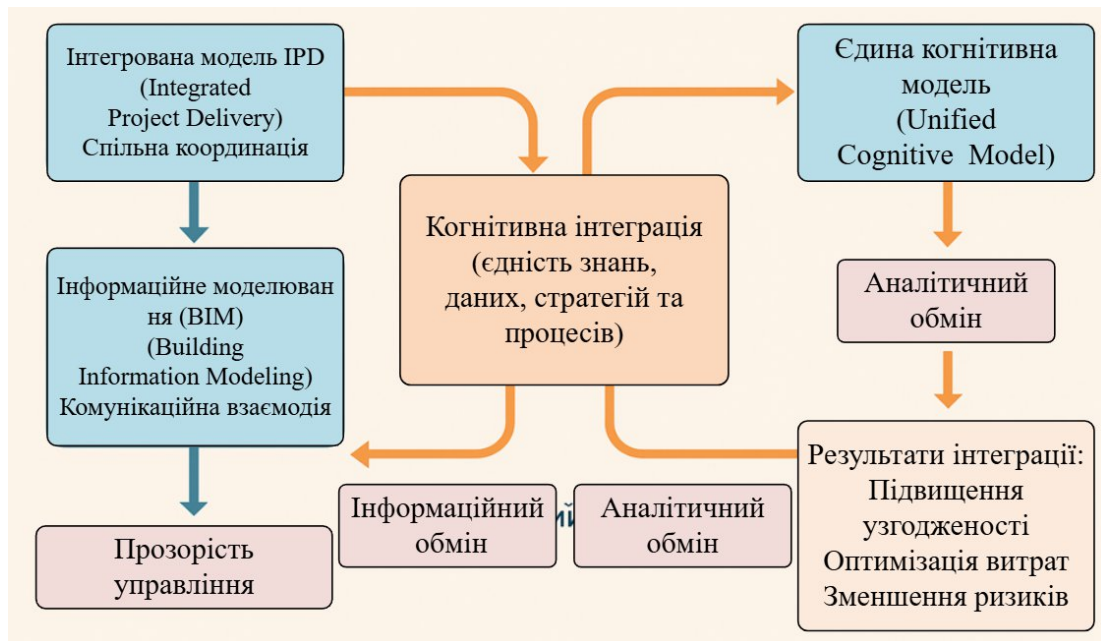


Рис. 3.13. Когнітивна інтеграція методів IPD та BIM
(розроблено автором на основі [142])

Важливою перевагою когнітивної інтеграції IPD–BIM є також формування адаптивної моделі прийняття рішень, у якій зміни в умовах або параметрах проєкту автоматично оновлюють управлінські сценарії. Ця властивість особливо цінна для складних інфраструктурних об'єктів, де взаємозалежність факторів висока, а ризики мають багатовимірну структуру. Когнітивна система дозволяє оцінювати не лише технічні показники, а й поведінкові аспекти — реакції учасників, часові затримки, ефект комунікацій [252]. Зрештою, така інтеграція сприяє переходу від класичного управління до інтелектуального управління проєктами, де рішення формуються на основі прогнозової аналітики, колективної пам'яті системи та гнучких сценаріїв адаптації.

Оцінювання ефектів інтеграції методів IPD та BIM у єдину когнітивну модель свідчить про суттєве підвищення ефективності в ключових напрямках: зменшення вартості реалізації проєкту, оптимізація часу, підвищення узгодженості дій, зменшення кількості колізій у будівельному процесі та підвищення прогнозованості результатів. Ці ефекти виникають не лише як наслідок технічної досконалості інструментів, а як результат когнітивного синтезу — коли технологічні, організаційні та інтелектуальні ресурси діють як єдина система.

Інтеграція методологій IPD (Integrated Project Delivery) та BIM (Building Information Modeling) створює нову парадигму управління проєктами, у центрі якої лежить когнітивна взаємодія між людиною, технологією та інформацією. На відміну від традиційних методів реалізації будівництва, що базуються на послідовній передачі даних між учасниками, інтегрована система IPD–BIM функціонує як єдиний когнітивний континуум, у якому інформація безперервно оновлюється, а знання циркулює між усіма рівнями управління. Ця синергія породжує структурні та інформаційні ефекти, які впливають на ефективність, узгодженість і прогнозованість проєктних рішень.

У межах такої інтеграції проєкт більше не сприймається як набір окремих завдань, а як динамічна когнітивна система, у якій цифрові моделі, управлінські процеси та поведінкові реакції взаємодіють у реальному часі. Метод BIM забезпечує інформаційний каркас — цифровий двійник об'єкта, що акумулює геометричні, фінансові, технічні та часові параметри. Метод IPD створює управлінську архітектуру — комунікативну платформу спільного прийняття рішень між усіма учасниками проєкту. У когнітивному аспекті ця інтеграція означає перехід від лінійної моделі управління до мультиагентної аналітичної системи, у якій усі учасники стають елементами єдиного мисленнєвого простору.

Структурно ефект інтеграції виявляється у формуванні багаторівневої інформаційної архітектури. На першому рівні формується інформаційне ядро — цифровий об'єкт BIM, який акумулює дані про всі елементи будівлі, включно з матеріалами, вартістю, енергоспоживанням і графіком виконання. На другому рівні діє організаційний контур IPD, який забезпечує когнітивну координацію команд через спільні цифрові середовища (CDE — Common Data Environment). На третьому рівні формується когнітивний аналітичний шар, де дані перетворюються на знання через застосування методів системного аналізу, штучного інтелекту та симуляційного прогнозування [254].

Для практичного відображення отриманих залежностей розглянемо конкретні приклади розрахунків, які демонструють кількісні аспекти функціонування когнітивної системи IPD–BIM.

Першою є функція когнітивного відгуку системи $K_{res}(t)$, що відображає, як інтегрована модель реагує на потік даних у часі з урахуванням зниження релевантності інформації. Для спрощення інтегральний вираз подано в дискретному вигляді з часовим кроком $\Delta t=1$ і коефіцієнтом когнітивного згасання $\lambda=0,15$. При часовому $t=5$ і вихідних параметрах інтенсивності $I=[120,150,130,160,140,170]$ та вагомості $W=[0,80,0,90,0,70,1,00,0,85,0,95]$ отримаємо вираз:

$$K_{res}(t) \approx \sum_{\tau=0}^t I(\tau) W(\tau) e^{-\lambda(t-\tau)}, \quad (3.10)$$

Підставляючи значення, маємо послідовні добутки, скориговані на коефіцієнт згасання: 45.35, 74.09, 58.02, 118.53, 102.42, 161.50. Сумарний когнітивний відгук у момент часу $t=5$ становить $K_{res}(5) \approx 559.92$. Це означає, що інтегрована система має сукупну актуальну інформаційну ємність близько 560 умовних одиниць, при цьому вагоміші і ближчі за часом події відіграють основну роль у формуванні когнітивної реакції системи. Такий розрахунок демонструє часову інерційність інформаційної пам'яті, яка забезпечує стабільність управлінського вибору навіть за умов змінних потоків даних.

Другим розрахунковим прикладом є оцінка ефекту інформаційної синергії E_{syn} , який описує взаємозв'язок між ступенем інформаційної інтеграції та рівнем структурної когерентності в єдиній когнітивній системі. Для цього використано вираз:

$$E_{syn} = \frac{I_i^2}{1 + e^{-\beta(C_s - C_{cr})}}, \quad (3.11)$$

де $I_i=0,78$, $C_s=0,72$, $C_{cr}=0,65$, $\beta=6$. Підставлення чисел дає: $-\beta(C_s-C_{cr})=-6(0,07)=-0,42$, а тому $e^{-0,42}=0,6570$. Отже, $E_{syn}=0,6084/1,6570=0,367$. Це свідчить про те, що за помірно високої інтеграції даних і структурної когерентності системи виникає помітний когнітивний резонанс, при якому інформаційні потоки починають підсилювати один одного, формуючи ефект самоузгодженості. У реальному управлінському середовищі така взаємодія відповідає моменту, коли цифрова модель і управлінська команда працюють як єдина когнітивна система.

Для відтворення узагальненої залежності між рівнем когнітивної інтеграції K_i та продуктивністю управління P_u використовується логістична функція

$$P_u(K_i) = \frac{P_{max}}{1 + e^{-a(K_i-K_0)}} \quad (3.12)$$

де $P_{max}=100$, $a=4$, $K_0=0,25$. Для основних рівнів інтеграції маємо такі результати: при $K_i=0,25$ $P_u=50,0\%$, при $K_i=0,50$ $P_u \approx 73,1\%$, при $K_i=0,75$ $P_u \approx 88,1\%$, а при $K_i=0,90$ $P_u \approx 93,1\%$. Отримана S-подібна крива демонструє, що найвищий приріст ефективності спостерігається у середньому діапазоні когнітивної інтеграції, після чого система досягає плато стабільної продуктивності.

Сукупно ці розрахунки відображають кількісну сторону когнітивних процесів у системі IPD–BIM. Вони показують, що аналітична рівновага між обсягом інформації, структурною когерентністю та рівнем інтеграції формує основу стабільного управлінського вибору. Значення $K_{res}(t)$ демонструє, наскільки глибоко система може акумулювати актуальні знання; E_{syn} відображає інтенсивність взаємопідсилення даних у межах інтегрованої архітектури; а функція $P_u(K_i)$ характеризує загальний результат когнітивної взаємодії в управлінському контурі. Разом вони формують математичну основу для кількісного оцінювання структурних і інформаційних ефектів інтеграції IPD–BIM, підтверджуючи, що когнітивна єдність цифрової та організаційної систем створює максимально ефективне середовище прийняття рішень.

Важливо, що інтегрована когнітивна модель не лише об'єднує інформацію, а й формує нову логіку прийняття рішень. Традиційна модель управління базується на причинно-наслідкових ланцюгах, тоді як когнітивна система IPD–BIM працює на основі мережових взаємозв'язків, де кожен елемент впливає на інші через потоки даних. Це дозволяє прогнозувати наслідки управлінських дій не постфактум, а на етапі моделювання. Таким чином, відбувається зсув від реактивного управління до передбачувального управління, де рішення формуються у цифровому середовищі ще до їх фізичної реалізації.

Для аналітичної оцінки структурних ефектів інтеграції доцільно розглядати систему за параметрами когнітивної повноти, інформаційної точності та рівня синхронізації. Таблиця 3.11 відображає, як ступінь інтеграції IPD–BIM впливає на якісні характеристики управлінського процесу.

Інтеграція методів IPD і BIM не лише покращує технічну ефективність управління, а й формує нову когнітивну логіку мислення команди. Вона проявляється у здатності

учасників проекту спільно створювати смисли, а не просто обмінюватися інформацією. Знання стає колективним продуктом, а не результатом індивідуальної експертизи. У цьому полягає головний структурний ефект інтеграції — формування спільної когнітивної свідомості проекту, що змінює саму природу управлінських рішень [79].

Ще одним важливим наслідком є поява ефекту когнітивної пластичності — здатності системи адаптуватися до змінних умов через постійне переосмислення зв'язків між даними, завданнями та ризиками.

Таблиця 3.11.

Вплив рівня інтеграції IPD–BIM на параметри когнітивної ефективності
(розроблено автором на основі [79])

Рівень інтеграції	Когнітивна повнота	Інформаційна точність	Узгодженість управлінських дій	Очікуваний ефект
Низький	Фрагментарна	Нестабільна	Вибіркова	Високий ризик помилок і дублювання
Середній	Часткова	Помірна	Локальна	Оптимізація окремих процесів
Високий	Системна	Висока	Узгоджена	Скорочення часу та витрат
Повний	Інтегрована	Максимальна	Синхронна	Самонавчальна когнітивна система

Якщо в традиційній моделі оновлення інформації відбувається після реалізації етапу, то у когнітивній системі оновлення є безперервним процесом. Це дозволяє моделі реагувати на зміни в реальному часі, зберігаючи баланс між стабільністю та інноваційністю.

Динаміку цього ефекту можна зобразити графічно, відобразивши залежність між рівнем когнітивної інтеграції (K_i) та продуктивністю управління (P_u), у вигляді рисунка 3.14 [261].

Загалом структурні та інформаційні ефекти інтеграції IPD і BIM формують основу когнітивно-аналітичного управління, у якому цифрові технології, організаційні процеси й людський інтелект зливаються в єдину систему. Ця система не лише оптимізує ресурси, а й створює передумови для самонавчання, що відкриває шлях до автономних форм управління будівельними проектами. У такій парадигмі проект перестає бути лише технічним об'єктом — він стає живою когнітивною системою, здатною думати, прогнозувати та вдосконалюватися разом зі своїми учасниками.

У сучасній будівельній практиці управління проектами дедалі більше набуває ознак інтелектуально-аналітичної діяльності, де ключову роль відіграє когнітивна взаємодія між інформаційними технологіями, учасниками процесу та структурою прийняття рішень. Інтеграція методів IPD (Integrated Project Delivery) та BIM (Building Information Modeling) створює основу для побудови когнітивної моделі, яка забезпечує узгодження всіх етапів життєвого циклу проекту — від проектування до експлуатації. Такий підхід забезпечує

формування динамічної системи управління, що самонавчається, аналізує свої дії та здатна коригувати процеси в реальному часі.

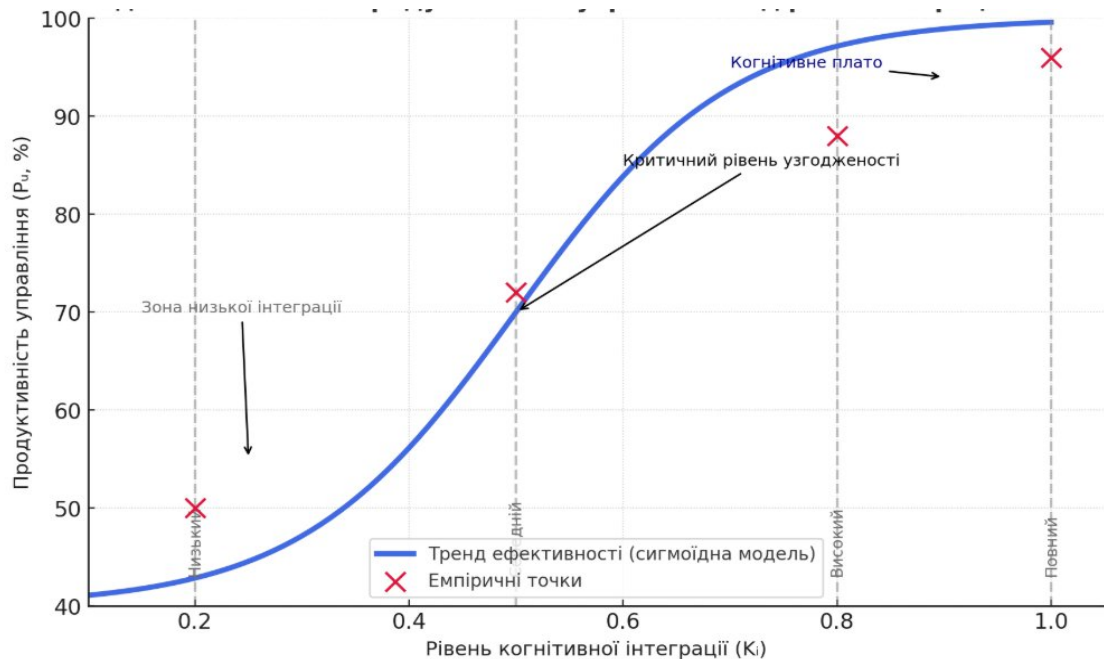


Рис. 3.14. Залежність продуктивності управління від рівня когнітивної інтеграції IPD–BIM (розроблено автором на основі [261])

Вплив когнітивної моделі IPD–BIM на ефективність управління пов'язаний із формуванням нового типу інформаційного середовища, у якому дані BIM виступають не лише технічними показниками, а й засобом накопичення знань. Дослідники Ерік Істман (Eric Eastman), Лаурі Коскела (Lauri Koskela), Юха Ківініємі (Juha Kiviniemi) та Патрік Сакс (Patrick Sacks) підкреслюють, що інтеграція BIM і IPD створює умови для переходу від фрагментарного управління до спільного мислення, де цифрова модель стає когнітивним простором взаємодії [80, 147, 141, 225]. У межах такого підходу учасники не лише обмінюються даними, а й формують спільну аналітичну свідомість проекту. Саме це дає можливість досягати глибокої синхронізації рішень, що суттєво впливає на ефективність управління життєвим циклом.

Когнітивна модель IPD–BIM функціонує як інформаційно-інтелектуальна екосистема, у якій дані, рішення та досвід утворюють єдину мережу знань. На початкових стадіях вона забезпечує швидке формування концепції проекту, на етапі будівництва — оптимізує координацію робіт, а під час експлуатації — гарантує постійне оновлення інформаційної бази. У результаті всі етапи життєвого циклу з'єднані у безперервну когнітивну траєкторію, де кожна дія породжує нову інформацію для аналізу та вдосконалення процесу. Як зазначає Мершброк Крістіан (Christian Merschbrock), саме завдяки BIM цифрова модель проекту «перетворюється на спільну ментальну карту», що дозволяє усім учасникам бачити не лише технічний стан, а й логіку розвитку системи [192].

Вплив когнітивної моделі IPD–BIM на управління можна виразити через функцію когнітивного ефекту життєвого циклу:

$$E_{LC} = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t \times K_t \times R_t)}{C_t + \Delta D_t}, \quad (3.13)$$

де E_{LC} — ефективність управління життєвим циклом, Q_t — якість процесів на етапі t , K_t — когнітивна узгодженість команди, R_t — релевантність інформації, C_t — витрати на етапі, ΔD_t — втрати даних унаслідок неузгодженості.

Чим більшим є рівень когнітивної узгодженості (K_t), тим вищим буде загальний ефект, оскільки зменшуються дублювання рішень і кількість помилок.

Дослідження Лаурі Коскели та Патріка Сакса показують, що інтеграція BIM і IPD створює механізм безперервного когнітивного зворотного зв'язку, який дозволяє контролювати та вдосконалювати процеси у реальному часі [147, 225]. На відміну від традиційних моделей управління, де контроль здійснюється після виконання етапу, когнітивна система працює в режимі постійного аналізу. Це дає змогу запобігати помилкам, а не виправляти їх постфактум, що істотно зменшує часові й фінансові витрати.

Для оцінювання впливу когнітивної інтеграції на параметри управління можна подати таблицю 3.12.

Таблиця 3.12. Ефекти когнітивної інтеграції IPD–BIM у межах життєвого циклу проекту (розроблено автором на основі [225])

Рівень когнітивної інтеграції	Інформаційна сталість	Якість управлінських рішень	Ефективність використання ресурсів	Узгодженість учасників
Низький	Дані фрагментовані	Нестабільна	Високі втрати часу	Низька
Середній	Часткова синхронізація	Помірна	Середня оптимізація	Обмежена
Високий	Єдина база даних BIM–IPD	Висока	Значна економія ресурсів	Висока
Повний	Самонавчальна когнітивна система	Максимальна	Мінімальні втрати	Повна узгодженість

Когнітивна ефективність управління може бути представлена також через показник часової оптимізації:

$$T_{opt} = T_0 \times e^{-\alpha(K_i + \beta I_d)}, \quad (5)$$

де T_0 — початково запланований час реалізації, K_i — рівень когнітивної інтеграції, I_d — насиченість інформаційного середовища, α, β — коефіцієнти чутливості системи. Формула показує, що підвищення когнітивної інтеграції та інформаційної щільності системи знижує час реалізації експоненційно — тобто чим глибше інтегровано IPD–BIM, тим швидше проєкт проходить свій життєвий цикл.

Важливо також розглядати рівень інформаційної ентропії системи як показник упорядкованості когнітивних процесів. Для цього використовується функція Шеннона:

$$H_t = - \sum_{i=1}^n p_i \log(p_i), \quad (3.14)$$

де H_t — ентропія у момент часу t , p_i — ймовірність появи інформаційного сигналу певного типу. Зменшення H_t у процесі розвитку проєкту свідчить про підвищення структурованості та стабільності інформаційного середовища, що є прямим наслідком впровадження когнітивної моделі.

Когнітивна модель IPD–BIM суттєво впливає на якість управління всіма етапами життєвого циклу будівельного проєкту. Її головна перевага — здатність трансформувати інформаційні потоки у знання, а знання — у передбачувані рішення. Завдяки цій властивості управлінська система стає здатною до самонавчання, аналітичного прогнозування та стратегічної стабільності. Це означає, що інтеграція IPD та BIM не лише оптимізує технічні процеси, а й формує новий тип когнітивної культури управління — культуру спільного мислення, де цифрова модель і людська свідомість діють як єдиний інтелектуальний механізм [191].

Істотним ефектом інтеграції IPD–BIM є зміна ролі управлінського рішення: воно перестає бути реакцією на події, натомість перетворюється на прогнозований результат системного аналізу. Це підкреслює Ерік Істман, який вказує, що когнітивна взаємодія між людиною і цифровою моделлю дає змогу досягти рівня «інформаційної інтуїції», коли система не просто відображає ситуацію, а передбачає її розвиток. Залежність між рівнем когнітивної інтеграції та економічною ефективністю управління можна подати у вигляді рсйунка 3.15.

Узагальнюючи результати дослідження інтеграції методів IPD (Integrated Project Delivery) та BIM (Building Information Modeling) у межах когнітивної моделі управління, можна стверджувати, що сучасна парадигма управління будівельними проєктами переходить від технократичної до інтелектуально-аналітичної. Це зумовлено тим, що ефективність управління сьогодні визначається не лише технологічним рівнем інструментів, а передусім здатністю системи до когнітивної взаємодії, тобто перетворення інформаційних потоків у знання, а знань — у колективні рішення. У цьому контексті IPD виступає основою спільної організаційної координації, а BIM — цифровим ядром інформаційної узгодженості. Їх об'єднання створює цілісне когнітивне середовище, де процес управління стає самонавчальним, адаптивним і прогнозним.

Сутність когнітивної моделі IPD–BIM полягає у формуванні єдиної системи сприйняття, аналізу та дії, у якій цифрові моделі, аналітичні алгоритми та людські рішення функціонують синхронно. Така система здатна не лише координувати інформацію, а й створювати нові знання — на основі постійного аналізу даних, зворотного зв'язку та сценарного мислення. У цьому процесі управлінський вибір перетворюється на когнітивний цикл, що поєднує аналітичне прогнозування, комунікативну взаємодію та рефлексивну оцінку наслідків. Саме завдяки цьому управління набуває властивостей цілісності, де кожне рішення є логічним продовженням попереднього, а вся система — саморегульованою структурою.

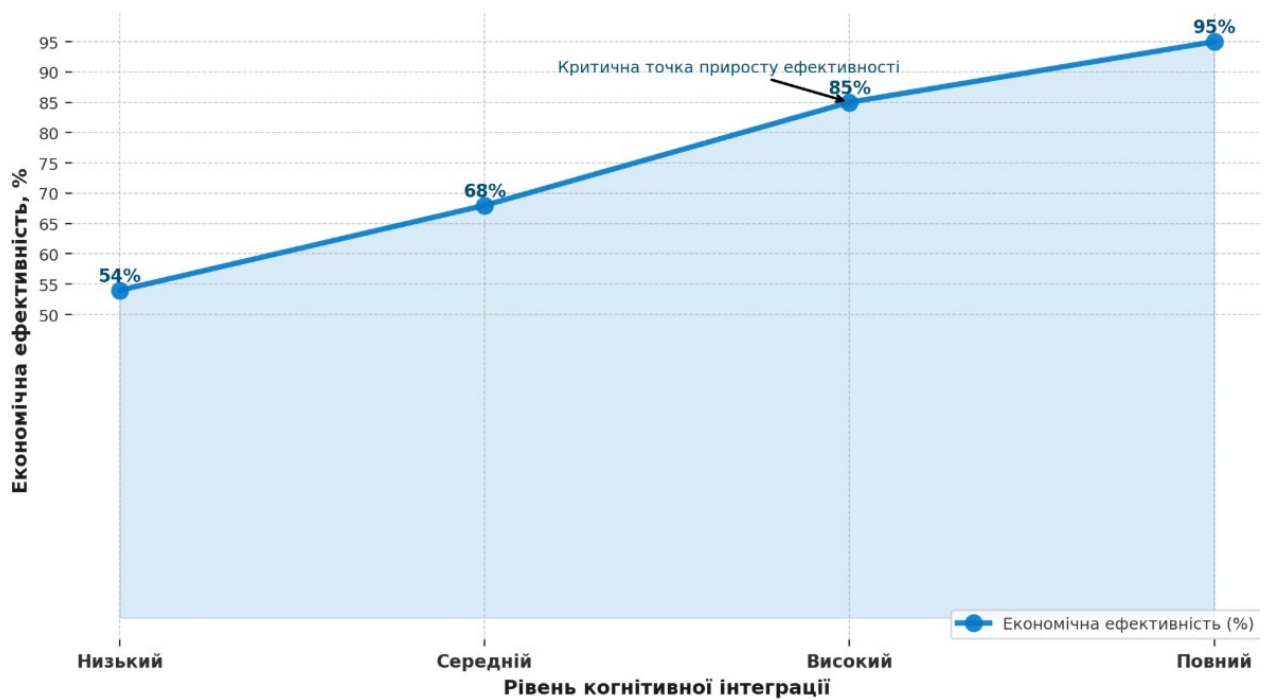


Рис. 3.15. Вплив рівня когнітивної інтеграції IPD–BIM на економічну ефективність проекту (розроблено автором на основі [191])

Інтеграція IPD і BIM створює ефект багаторівневої когнітивної синергії. На рівні проектування це проявляється в зменшенні інформаційних втрат і дублювання процесів; на рівні реалізації — у точнішій координації ресурсів і скороченні часу виконання; на рівні експлуатації — у підвищенні передбачуваності та прозорості рішень. Зрештою, система функціонує як замкнений аналітичний контур, у якому кожен етап не лише завершує попередній, а й забезпечує навчання для наступного. Це формує основу когнітивної зрілості проекту, що проявляється у здатності системи самостійно аналізувати власний стан і прогнозувати наслідки майбутніх дій.

Ключовим ефектом інтеграції є створення нового типу управлінської культури — культури когнітивної взаємодії, у якій технологічні та людські фактори не конкурують, а взаємно підсилюють одне одного. Учасники процесу стають не лише виконавцями, а співавторами управлінських знань. Це призводить до появи феномену колективного інтелекту проекту, де рішення формуються через спільне осмислення даних, а не через адміністративний розподіл функцій. Таким чином, управлінська ефективність досягається не лише за рахунок точності аналітики, а й через єдність мислення, що охоплює всі рівні організації [174].

Побудована когнітивна модель інтеграції IPD–BIM забезпечує структурну стійкість системи, підвищує якість стратегічного прогнозування та створює умови для інноваційного розвитку. Вона формує простір, у якому інформація перетворюється на знання, знання — на дії, а дії — на досвід, що знову повертається до системи у вигляді нових даних. У результаті виникає управлінський цикл без втрати когерентності, де кожна фаза підсилює іншу. Це означає, що майбутнє будівельних і інфраструктурних проектів неминуче пов'язане з когнітивними моделями управління — системами, які не лише відображають реальність, а й мислять, прогнозують і розвиваються разом із нею.

Отже, інтеграція IPD і BIM у когнітивну структуру є не просто технічним удосконаленням процесу, а глибоким концептуальним зрушенням у розумінні управління. Вона демонструє, що ефективне управління в XXI столітті — це не лише контроль чи планування, а насамперед осмислення, навчання й аналітична співтворчість. У цій логіці когнітивна модель IPD–BIM стає центральним елементом нової управлінської парадигми, де інформація й інтелект формують єдину систему, здатну забезпечити стабільний розвиток, стратегічну гнучкість і гармонійне поєднання людини з технологією.

РОЗДІЛ 4. КОГНІТИВНО-ІНТЕГРАЦІЙНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ БУДІВЕЛЬНИМИ ПРОЄКТАМИ

4.1. Система когнітивної взаємодії учасників будівельного проєкту

Ефективність управління проєктом значною мірою визначається якістю й стійкістю комунікаційних зв'язків між членами команди, адже саме вони забезпечують узгодженість дій та швидкість прийняття рішень. Сучасні інформаційні технології суттєво трансформували архітектуру цих зв'язків, змінюючи темп обміну даними, способи колективного створення знань і механізми їх поширення у межах проєкту [194]. Комунікаційна система команди охоплює індивідів, інформаційні потоки (дані та знання), засоби передавання й характерні бар'єри, що можуть перешкоджати руху інформації; тож менеджери все частіше потребують інструментів, які дозволяють ідентифікувати й вимірювати ці зв'язки, визначати їхні слабкі місця та шляхи поліпшення [185].

Для результативного управління керівнику важливо розуміти, як саме відбувається взаємодія всередині проєкту, які канали працюють найефективніше, хто виконує роль ключових фігур у передачі знань, а де виникають затримки чи спотворення інформації. Таке діагностування опирається на підходи мережевого аналізу, у яких структурна значущість елементів визначається їхньою позицією та інтенсивністю зв'язків: найвпливовіші вузли зазвичай займають центральні позиції в графі й мають велику кількість прямих або опосередкованих контактів. Міри центральності допомагають оцінити роль вузла у взаємодії з найближчими сусідами та зрозуміти рівень його внеску у циркуляцію інформації, що робить вимірювання центральності базовим інструментом дослідження комунікаційних структур [96].

Класичні формулювання структурної центральності у соціальних мережах запропоновано з урахуванням інтуїтивної відповідності інтерпретації показників, що дає змогу коректно порівнювати позиції різних вузлів. Подальший розвиток отримали узагальнені класифікації підходів до аналізу мереж і типів центральності, незалежно від конкретної сфери застосування, що полегшує перенесення методів між доменами [299]. Також запропоновано єдину систему оцінювання показників центральності, зосереджену на участі вузла у структурі обходів мережі та його впливі на поширення інформації, що підвищує точність виявлення ключових елементів комунікаційної інфраструктури проєкту [289].

Спроби дати формальне, аксіоматичне визначення поняття центральності було зроблено у низці наукових праць. Дослідники намагалися описати це явище не лише інтуїтивно, а й через строгі математичні принципи, що дозволяють оцінювати центральність вузлів у різних типах мереж за єдиними правилами. У подальших дослідженнях автори детально проаналізували поведінку різних мір центральності на малих графах, показавши, що навіть у невеликих структурах різні підходи до оцінювання можуть давати відмінні результати ранжування, підкреслюючи багатовимірність і контекстну залежність поняття центральності [83].

Методи мережевого аналізу, зокрема розрахунок показників центральності, набули широкого поширення в прикладних дослідженнях, охоплюючи як соціальні, так і технічні системи. Так, Мао та співавт. застосували ці методи для вивчення соціальної мережі взаємозв'язків між клієнтами банку, визначаючи міру їхнього взаємного впливу. Sen та

колеги досліджували індійську залізничну мережу, порівнюючи її структурні характеристики з властивостями систем типу «малого світу» [200]. Fowler і Jeon використали мережевий підхід для аналізу судових прецедентів Верховного суду США, побудувавши ранжування справ за рівнем їх значущості у правовій системі [201]. Ці приклади свідчать про універсальність мережевих методів та їхню ефективність у дослідженні складних систем різного походження.

Мережевий аналіз виявився надзвичайно корисним і для вивчення процесів у сфері будівництва, зокрема при аналізі організаційних структур проєктів. Одні з перших робіт у цьому напрямі були присвячені вивченню комунікацій між основними учасниками реалізації будівельного проєкту — замовником, менеджером, архітектором і підрядником. У цих дослідженнях було показано, що ефективність проєкту значною мірою залежить від цільності та якості зв'язків між цими ключовими суб'єктами. Подальші дослідження розвинули цю ідею. Так, Pryke запропонував розглядати будівельний проєкт як мережу організацій, між якими циркулюють інформаційні потоки та відбувається взаємодія через комунікаційні канали [202]. Madani та співавт. застосували мережевий аналіз до вивчення концепції «інтелектуальних будівель», що дало змогу виявити найбільш ефективні технології та визначити потенційні напрями інноваційного розвитку. Abbsaian-Hosseini зі співавт. досліджували залежність між ступенем центральності учасників і результативністю їх спільної діяльності, довівши, що команди з вищим рівнем центральності демонструють кращі показники взаємодії та продуктивності [165].

У сучасних дослідженнях мережевих структур будівельних проєктів усе частіше використовується аналіз соціальних мереж (SNA — Social Network Analysis). Цей підхід поєднує кількісні й якісні методи для вивчення соціальних структур, представлених у формі мережевих систем. Інструментарій SNA дозволяє не лише фіксувати існування зв'язків між учасниками, а й аналізувати їхню інтенсивність, напрямок і роль у функціонуванні колективу. Зокрема, він забезпечує можливість: — розглядати соціальні структури як мережу відносин між їхніми елементами; — акцентувати увагу на зв'язках та їхній динаміці, а не лише на окремих акторах мережі; — вивчати спільноти, колективи й організації як системи взаємодії, що визначають характер колективної поведінки [115].

Аналіз соціальних мереж (Social Network Analysis, SNA) є логічним продовженням розвитку мережевої парадигми в теорії суспільних наук. Первинно цей підхід був сформований у межах соціології, антропології та комунікативних досліджень, де використовувався для вивчення закономірностей соціальної взаємодії в різних типах спільнот — від племінних і сімейних структур до міських і муніципальних систем. Згодом SNA набув статусу потужного теоретико-методологічного інструменту в галузі організаційних наук та менеджменту. Сьогодні аналіз соціальних мереж активно застосовується для дослідження широкого кола економічних, управлінських та організаційних процесів, а також для вивчення систем комунікації в сучасних організаціях і між ними [73].

Науковці Ноурія (Nohria) та Еклс (Eccles) визначили низку причин, які пояснюють, чому мережева перспектива в аналізі управлінських процесів має особливу цінність. По-перше, організаційну структуру можна подати у вигляді соціальної мережі, де зв'язки між вузлами відображають динаміку взаємин між людьми та підрозділами. По-друге, зовнішнє середовище, у якому функціонує організація, також можна описати як систему

взаємозв'язків між різними організаціями, проєктами чи програмами. По-третє, більшість організацій є частиною складних, багаторівневих мереж, які важко дослідити, спираючись лише на позицію однієї структури. По-четверте, поведінку, цінності та дії людей доцільно аналізувати з урахуванням їх положення у мережі соціальних зв'язків. І, нарешті, при порівняльному аналізі різних організацій особливу увагу слід приділяти саме тому, як сформовані їхні комунікаційні мережі, адже вони безпосередньо впливають на ефективність управлінських процесів [213].

У сфері будівництва мережевий підхід набув практичного значення завдяки роботам Прайка (Pryke), який розглядав будівельний проєкт як мережу соціальних взаємин, у якій обмін інформацією та комунікація між учасниками формують основу ефективної співпраці [109]. Дослідження, проведене автором, включало аналіз кількох будівельних проєктів із використанням як традиційних, так і партнерських моделей взаємодії. Застосування SNA дало змогу виявити переваги інтегрованих методів реалізації проєктів і визначити закономірності інформаційних потоків. Подальші роботи засвідчили, що мережеві підходи мають значний потенціал у вивченні інтеграційних процесів у будівельній галузі.

Особливу увагу дослідники приділяють самоорганізованим мережам, що формуються під час реалізації великих інфраструктурних проєктів. Прайк і його колеги застосували SNA для аналізу таких систем, показавши, що навіть за відсутності жорсткої ієрархії між учасниками можуть виникати стійкі зв'язки, які забезпечують ефективну координацію [227]. У свою чергу, Гейліген (Heylighen) визначає самоорганізацію як процес утворення колективних і скоординованих зв'язків між агентами без прямого зовнішнього управління, коли структура мережі виникає природно в результаті взаємодії [209].

Отримані дані свідчать, що подібні мережі мають низку характерних ознак: вони вирізняються високою розрідженістю, короткою середньою довжиною шляхів і значною кластеризацією у межах щільних «функціональних спільнот», які формуються навколо ключових учасників. Ці властивості забезпечують стійкість системи та підвищують її адаптивність у складних умовах реалізації проєкту.

Останні публікації демонструють подальше зростання інтересу до застосування аналізу соціальних мереж у будівельній галузі. У двох новітніх дослідженнях автори проаналізували структуру самоорганізованих мереж між учасниками будівельних проєктів, що дозволило їм виявити низку проблем у комунікації та координації дій. Подальший етап роботи полягав у розробленні методів оптимізації комунікаційних процесів, спрямованих на підвищення прозорості, швидкості обміну інформацією та загальної ефективності взаємодії між командами.

Основою аналізу соціальних мереж є математичні моделі та методи, розроблені в межах теорії графів, які адаптовано для дослідження соціальних, економічних і комунікативних систем. Згідно з положеннями цієї теорії, позиція окремого учасника в мережі — центральна чи периферійна — безпосередньо впливає на його доступ до цінних ресурсів і інформаційних потоків [167]. Отже, структурне розташування вузла в мережі визначає його потенціал впливу, здатність акумулювати або передавати інформацію, а також можливість формувати зв'язки, що мають стратегічне значення для всієї системи.

Однією з найсуттєвіших переваг аналізу соціальних мереж є можливість візуалізації структур взаємодії. За допомогою спеціалізованих аналітичних інструментів

дослідник може зібрати емпіричні дані про зв'язки між учасниками та відтворити їх у графічній формі. Такі схеми є не лише зручними для сприйняття, а й репрезентують повноцінну модель організаційної взаємодії, що дозволяє простежити комунікаційні потоки, визначити рівень зв'язності та оцінити ефективність мережевої структури. У контексті управління проєктами ці візуальні моделі допомагають зрозуміти, як розподіляється інформаційна динаміка між учасниками реалізації проєкту.

Під час аналізу графів застосовується широкий спектр кількісних показників, які дозволяють описати структуру мережі. Найпростіші з них — кількість вузлів і ребер — характеризують розмір та розрідженість системи. Ступінь вузлів показує, наскільки інтенсивно окремих елемент пов'язаний із сусідніми. Інші показники враховують геодезичні відстані між вузлами або рівень центральності, що дозволяє оцінити, наскільки певний вузол є ключовим для циркуляції інформації.

Залежно від напрямку аналізу, усі показники графів можна поділити на кілька груп. По-перше, метрики мережевого рівня, що характеризують загальні властивості графа: щільність, середній ступінь зв'язності, середню довжину шляху та коефіцієнт кластеризації. Вони відображають рівень згуртованості мережі та те, наскільки всі учасники команди інтегровані у загальну систему зв'язків.

По-друге, метрики вузлового рівня, які описують індивідуальні властивості кожного учасника — зокрема показники центральності. Ці значення дозволяють визначити, хто в структурі мережі має найбільший вплив, через кого проходять основні інформаційні потоки, а також які елементи є найбільш ізольованими чи периферійними. По-третє, метрики спільнотного рівня, що дозволяють оцінити ступінь схильності вузлів до утворення груп або кластерів. Вони допомагають зрозуміти, як формуються підструктури всередині загальної мережі, та виявити центри комунікаційної активності.

Одним із базових показників у цьому контексті є щільність мережі, що визначає міру її згуртованості. Формально вона обчислюється як співвідношення кількості фактичних зв'язків до максимально можливої кількості зв'язків між усіма вузлами. Значення цього показника коливається в межах від 0 до 1: нуль означає повну відсутність взаємодії між учасниками, тоді як одиниця — повну зв'язаність мережі. Висока щільність, як правило, асоціюється з ефективнішою комунікацією та швидшим поширенням інформації. Водночас надмірна згуртованість може призводити до дублювання каналів, інформаційного перевантаження або явища групового мислення, коли зникає критичне оцінювання ідей [103].

У соціальних мережах показник щільності використовується для оцінки швидкості обміну інформацією та доступності учасників один для одного. Відомо, що в мережах наукової співпраці, як показав Ньюман, структура є відносно щільною, що зумовлено високим рівнем інтеграції між дослідниками та необхідністю постійного обміну знаннями [196]. Натомість Браха і Бар-Ям у своїх дослідженнях інженерних мереж виявили низький рівень щільності, що свідчить про переважно розріджену структуру взаємодії. Такі системи залежать не стільки від кількості зв'язків, скільки від їхньої якості та ефективності. Іншими словами, у технічно орієнтованих мережах швидкість і точність передавання інформації визначаються не обсягом комунікацій, а характером зв'язків і довірою між учасниками [36].

Щільність мережі є одним із базових показників, що відображає ступінь зв'язаності між її елементами. Вона визначає, яку частку від максимально можливої кількості зв'язків

фактично реалізовано в системі. Іншими словами, цей показник демонструє, наскільки інтенсивною є взаємодія між усіма учасниками мережі. Формально щільність обчислюється за формулою:

$$D = \frac{2E}{V(V-1)}, \quad (4.1)$$

де D — коефіцієнт щільності мережі, E — кількість наявних зв'язків (ребер) між учасниками, V — кількість вузлів (тобто елементів або учасників мережі).

Чисельник формули враховує подвійну кількість зв'язків, оскільки кожне ребро поєднує дві вершини. Значення D змінюється в діапазоні від 0 до 1: коли $D \rightarrow 0$, мережа розріджена, а зв'язки поодинокі; коли $D \rightarrow 1$, система максимально згуртована, тобто кожен учасник має контакт із кожним іншим.

Іншим важливим параметром є середній ступінь зв'язності мережі, що показує, скільки зв'язків у середньому має кожен учасник системи [194]. Ступінь окремого вузла визначається кількістю зв'язків, які з'єднують його з іншими. Середній ступінь можна розрахувати як:

$$\bar{k} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^V k_i, \quad (4.2)$$

де $\bar{k}$ — середній ступінь зв'язності, k_i — кількість зв'язків (ступінь) i -го вузла, V — загальна кількість вузлів у мережі.

Цей показник відображає ступінь «включеності» учасників у комунікаційний процес. Якщо $\bar{k}$ є високим, це свідчить про насиченість мережі інформаційними потоками, тісну співпрацю та вищу швидкість циркуляції знань у команді.

Щоб оцінити, наскільки вузли в мережі схильні утворювати тісні локальні групи, використовується коефіцієнт кластеризації [311]. У реальних організаційних або соціальних структурах часто виникає тенденція до утворення підгруп — спільнот, де учасники мають більшу кількість внутрішніх зв'язків, ніж з іншими елементами системи. Для оцінювання цього ефекту застосовується формула:

$$C = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^V \frac{2e_i}{k_i(k_i-1)}, \quad (4.3)$$

де C — середній коефіцієнт кластеризації мережі, e_i — кількість зв'язків між сусідами i -го вузла, k_i — кількість безпосередніх контактів вузла i , V — кількість вузлів у мережі.

Високе значення C означає, що система характеризується сильною локальною зв'язаністю, тобто більшість учасників взаємодіють у рамках стабільних комунікативних груп. Це позитивно впливає на довіру та узгодженість дій, але може зменшувати відкритість системи до зовнішніх контактів.

Ще одним ключовим параметром є центральність мережі, яка показує, наскільки інформаційна структура має домінуючі елементи. Центральність можна розглядати як міру нерівномірності розподілу впливу серед вузлів. Якщо більшість інформаційних потоків проходить через невелику кількість учасників, то мережа вважається централізованою. Навпаки, якщо зв'язки розподілені більш рівномірно, система набуває децентралізованого характеру, що підвищує її стійкість і адаптивність.

Для кількісної оцінки центральності мережі можна використати узагальнену нормовану формулу:

$$C_{\text{net}} = \frac{\sum_{i=1}^V (C_{\text{max}} - C_i)}{(V - 1)(V - 2)}, \quad (4.4)$$

де C_{net} — загальний показник центральності мережі, C_i — індивідуальна центральність кожного вузла, C_{max} — найбільше значення центральності серед усіх вузлів, V — кількість учасників.

Високе значення C_{net} вказує на домінування одного або кількох центральних учасників, через яких проходить більшість зв'язків. Такі елементи часто виступають «інформаційними посередниками» або «вузлами впливу».

У практиці аналізу соціальних мереж існує кілька підходів до визначення мір центральності мережі, що відображають різні аспекти структурної організації системи.

Перший підхід розглядає центральність із позиції компактності графа — тобто ступеня близькості вузлів один до одного. Згідно з цією логікою, граф вважається тим більш центральним, чим менша середня відстань між його вершинами. Це означає, що чим щільніше з'єднані елементи системи, тим вищим є рівень її когерентності та внутрішньої інтеграції.

Другий підхід інтерпретує центральність графа як різницю між значенням центральності найбільш важливого вузла і показниками центральності всіх інших вузлів. У цьому випадку центральність відображає схильність певного елемента мережі до домінування, а сама структура — до ієрархічності. Таким чином, якщо у графі наявний один або кілька вузлів, які значно перевищують інших за впливом, система вважається централізованою.

Загалом, міра центральності графа має відображати, наскільки центральність провідного вузла перевищує центральність решти елементів, та виражатися як відношення цієї переваги до максимально можливого значення для даної структури. Для кількісного обчислення цього показника використовується формула:

$$CG = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{\text{max}} - C_i)}{\text{max} \left[\sum_{i=1}^n (C_{\text{max}} - C_i) \right]}, \quad (4.5)$$

де CG — міра центральності графа G , C_{max} — найбільше значення центральності серед усіх вузлів, C_i — показник центральності i -го вузла, n — кількість вузлів у графі.

Іншими словами, чим більшою є різниця між найбільш центральним вузлом і рештою учасників, тим вище рівень централізації мережі.

Ще одним важливим аналітичним показником є середня довжина шляху, яка визначає мінімальну кількість зв'язків, що потрібно пройти, аби досягти від одного учасника до іншого. Високе значення цього показника свідчить про складну комунікаційну структуру, яка уповільнює обмін інформацією та підвищує ризик втрати даних. Натомість низьке значення середньої довжини шляху підвищує ефективність передавання інформації, забезпечує швидше поширення знань і сприяє формуванню більш згуртованих спільнот [373].

Як зазначалося раніше, основою для кількісного аналізу соціальних взаємозв'язків є теорія графів, у межах якої мережу можна представити у вигляді неорієнтованого графа $G=(V,E)$, де V — непорожня множина вузлів (учасників мережі), а E — множина зв'язків (ребер), що утворюють пари виду $e=(u,v)$, де $u,v \in V$.

У такому представленні учасники проєкту розглядаються як вершини графа, а комунікаційні канали між ними — як ребра, що відображають взаємодію. У даному випадку граф має ненаправлений зважений характер, тобто кожне ребро характеризується певним ваговим коефіцієнтом, який відображає силу або інтенсивність зв'язку між учасниками. Множина ребер при цьому утворюється з неупорядкованих пар вузлів, де $(u,v)=(v,u)$ [216].

Для дослідження взаємозв'язків між учасниками проєкту доцільно розглянути низку показників центральності, зокрема: центральність за ступенем, центральність за посередництвом, центральність за близькістю, центральність за власним вектором, а також індекс важливості або впливовості PageRank. Кожен із цих показників відображає різні аспекти участі елемента в мережевій структурі та дозволяє оцінити рівень його впливу на інформаційні потоки системи.

Найбільш простою для інтерпретації і водночас фундаментальною є центральність за ступенем (Degree Centrality). Цей показник визначає рівень зв'язаності певного вузла, тобто кількість його безпосередніх контактів із іншими елементами мережі. Фактично, він характеризує, наскільки активно конкретний учасник взаємодіє з оточенням, і може розглядатися як показник його впливу або важливості у структурі взаємозв'язків.

Центральність за ступенем розраховується виключно на основі кількості ребер, що з'єднують вузол із іншими, і не враховує ні вагу зв'язків, ні їх напрям. Для порівняння різних мереж цей показник часто нормалізується — тобто подається у вигляді частки відношення кількості зв'язків вузла до максимально можливої кількості зв'язків у мережі. Таким чином, вузол із більшою кількістю прямих контактів матиме вищу центральність і, відповідно, більший потенціал впливу на обмін інформацією всередині системи.

Якщо в мережі існує один вузол, який має зв'язки з усіма іншими, тоді як решта вузлів сполучені лише з ним, така структура має вигляд «зірки». У цьому випадку центральний елемент розташовується в центрі мережі, тоді як усі інші вузли формують її периферію. Подібна структура характеризується максимальним рівнем централізації за ступенем, який дорівнює одиниці. Вона відображає ситуацію, коли інформаційні потоки концентруються навколо одного провідного учасника, що виконує роль головного комунікаційного вузла.

Рисунок 4.1 показує домінуюче положення центрального елемента, який з'єднаний безпосередньо з усіма іншими, тоді як зв'язки між периферійними вузлами відсутні. Саме

тому структура типу «зірка» часто використовується як еталонна модель для візуального та аналітичного опису центральності за ступенем у мережевому аналізі [347].



Рис. 4.1. Змістове трактування центральності за ступенем
(розроблено автором на основі [347])

Центральність мережі за ступенем є базовим показником, що відображає рівень концентрації зв'язків у системі та дозволяє оцінити, наскільки комунікаційна структура тяжіє до централізованої форми. Вона характеризує ступінь домінування одного або кількох вузлів, які акумулюють навколо себе більшість взаємодій.

Узагальнено центральність мережі за ступенем можна виразити як відносну різницю між вузлом із найбільшим числом зв'язків та іншими елементами системи. Ця міра визначається за формулою:

$$C_D = \frac{1}{N^2 - 3N + 2} \sum_{i=1}^N |k_{max} - k_i|, \quad (4.6)$$

де C_D — коефіцієнт централізації мережі за ступенем, k_{max} — максимальна кількість зв'язків (ступінь) серед усіх вузлів, k_i — кількість зв'язків вузла i , N — загальна кількість вузлів у мережі.

Ця формула показує, наскільки сильно відрізняється ступінь зв'язності кожного вузла від максимально можливої кількості зв'язків. Якщо різниця між вузлами мінімальна, мережа вважається децентралізованою; натомість значне відхилення свідчить про централізацію комунікацій навколо одного або кількох ключових елементів.

Для неорієнтованих графів зручно описувати зв'язки між вузлами за допомогою матриці суміжності $A=[a_{ij}]$, яка є квадратною матрицею розміру $N \times N$. У цій матриці елемент a_{ij} набуває значення 1, якщо між вузлами i та j існує зв'язок, і 0 — якщо зв'язку немає. Тоді центральність вузла i за ступенем можна визначити через відношення кількості його реальних зв'язків до максимально можливої кількості зв'язків у графі:

$$C_{Di} = \frac{\sum_{j=1}^N a_{ij}}{N-1}, \quad (4.7)$$

де C_{Di} — нормалізоване значення центральності вузла i , a_{ij} — елемент матриці суміжності (0 або 1), $N-1$ — максимально можлива кількість зв'язків одного вузла.

У напрямлених (орієнтованих) мережах кожен вузол може мати два різновиди ступеня:

- вхідний ступінь (in-degree) — кількість зв'язків, що спрямовані до вузла;
- вихідний ступінь (out-degree) — кількість зв'язків, які виходять від нього.

Формально ці величини можна записати як:

$$k_i^{in} = \sum_{j=1}^N a_{ji}, \quad k_i^{out} = \sum_{j=1}^N a_{ji}. \quad (4.8)$$

Вхідний ступінь характеризує рівень «отримання» інформації, тобто наскільки вузол є приймачем даних, тоді як вихідний ступінь описує його активність як джерела комунікації. У соціальних чи управлінських системах це може відповідати, наприклад, кількості повідомлень, які керівник отримує або надсилає іншим членам команди.

Незважаючи на простоту, центральність за ступенем залишається одним із найінформативніших показників у мережевому аналізі. Вона дозволяє оцінити потенціал учасника впливати на інформаційні потоки, контролювати обмін знаннями або забезпечувати комунікаційне посередництво. Люди або елементи, які мають більшу кількість зв'язків, зазвичай володіють більшими можливостями впливу, доступом до інформації та контролем над процесом обміну повідомленнями.

Подібна логіка спостерігається й у мережах наукового цитування, де кількість посилок на певну публікацію розглядається як аналог центральності за ступенем. Таким чином, стаття з великою кількістю цитувань займає центральне положення в науковій мережі, відображаючи її значущість для розвитку галузі.

Еволюційним розвитком цієї концепції стала центральність за власним вектором (Eigenvector Centrality), яка враховує не лише кількість зв'язків, але й вагомість вузлів, з якими вони встановлені. На відміну від попередньої метрики, вона оцінює не просто кількість контактів, а «якість» зв'язків — тобто впливовість сусідів вузла. Це означає, що вузол, який має небагато, але дуже авторитетних сусідів, може мати вищу вагу, ніж вузол із великою кількістю слабких контактів.

У такий спосіб центральність за власним вектором краще відображає реальні закономірності соціальних та організаційних систем, де не кількість, а значущість зв'язків формує впливову позицію учасника в мережі [91].

Отже, міра центральності за власним вектором (Eigenvector Centrality) дає змогу враховувати не лише кількість зв'язків вузла, а й вагу та впливовість його сусідів у мережі. На відміну від центральності за ступенем, де кожен зв'язок має однакове значення, ця метрика надає більшого значення тим вузлам, які пов'язані з уже впливовими або високоцентральними елементами.

Під час обчислення даного показника кожному вузлу не просто присвоюється одиниця за наявність зв'язку, а визначається оцінка, пропорційна сумі значень центральності його сусідів. Іншими словами, вузол отримує вищу вагу, якщо він пов'язаний із тими, хто сам відіграє важливу роль у мережі. Таким чином, центральність за власним вектором відображає не лише локальну активність вузла, а й його залученість у глобальну структуру взаємодій, підкреслюючи взаємопідсилювальний ефект впливу між ключовими учасниками системи.

Рисунок 4.2 демонструє, що вузли, пов'язані з іншими високовпливовими елементами, займають стратегічно важливе положення в мережі, навіть якщо мають порівняно меншу кількість безпосередніх контактів [91].

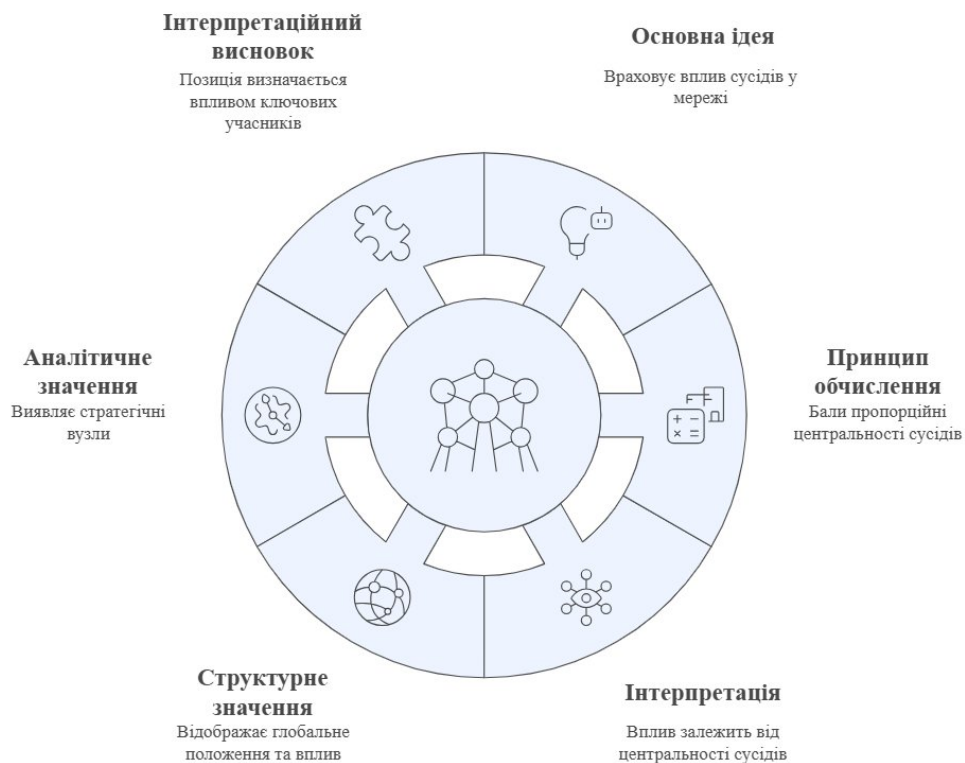


Рис. 4.2. Змістовне трактування центральності вузла на основі власного вектора (розроблено автором на основі [91])

4.2. Діагностика причин інформаційних дисонансів і переробок у BIM-середовищі

Проблематика переробок (rework) у будівельних проєктах є одним із найсуттєвіших чинників, що впливають на ефективність реалізації проєкту, його вартість, терміни виконання та рівень задоволеності замовника. У науковій літературі переробки

розглядаються не лише як технічне чи організаційне відхилення, а як системне явище, що відображає взаємозв'язок між якістю управління, точністю проєктних рішень і якістю виконання робіт.

Дослідники пропонують класифікувати переробки на позитивні та негативні. Позитивні переробки розглядаються як дії, що додають цінність кінцевому продукту, покращують його якісні характеристики або підвищують рівень задоволення клієнта. Такі зміни, як правило, узгоджуються з основними учасниками проєкту та є результатом цілеспрямованого вдосконалення. Натомість негативні переробки виникають унаслідок відхилень від проєктних вимог, помилок у процесі планування чи виконання, що призводить до втрати ресурсів, затримок і додаткових витрат.

Переробка, по суті, стає необхідною тоді, коли певний елемент будівельних робіт не відповідає проєктним або контрактним вимогам. Вона є коригувальною дією, метою якої є забезпечення відповідності фактичного результату нормативним і технічним критеріям проєкту.

У сучасній термінології поняття «переробки» має кілька інтерпретацій. Залежно від контексту, його ототожнюють із поняттями «невідповідність», «відхилення в якості», «дефекти» або «помилки якості». Відповідно до визначення Construction Industry Development Agency (CIDA), переробка — це принаймні одна додаткова дія, спричинена невідповідністю встановленим вимогам. Вона характеризується повторним виконанням операцій, що зумовлено попередньою помилкою або недотриманням стандартів [300].

У ширшому розумінні, переробку можна визначити як вимушений процес доопрацювання або виправлення з метою приведення об'єкта у відповідність до проєктної документації. Construction Industry Institute (CII) визначає її як повторне виконання певних дій, що призводить до часткового або повного анулювання вже зробленої роботи [161]. Таким чином, переробка — це прояв неефективності системи управління, який знижує продуктивність і збільшує витрати.

Основними джерелами виникнення переробок у будівництві вважаються помилки, пропуски та зміни [62].

- Помилки — це дії, виконані неправильно, що призводять до відхилення від заданих параметрів.
- Пропуски — це недоліки або відсутність необхідних операцій, перевірок чи узгоджень.
- Зміни — це модифікації, що вносяться вже після початку реалізації робіт, найчастіше через уточнення вимог або проєктних даних.

Переробки, спричинені помилками, є найпоширенішими. Вони можуть виникати як на стадії проєктування, так і під час будівництва. Особливо небезпечними є помилки, які залишаються непоміченими тривалий час, адже вони накопичуються, створюючи «ефект інкубації» у системі. Як зазначають Busby і Hughes, такі помилки стають очевидними лише після певного періоду, коли їх наслідки вже неможливо усунути без значних витрат.

Результати дослідження Construction Industry Institute (CII), проведеного на дев'яти великих промислових проєктах, показали, що 79% вартості усіх переробок припадало на помилки, допущені на етапі проєктування [64]. Це свідчить, що значна частина проблем

може бути попереджена завдяки вдосконаленню процесів моделювання, перевірки та міждисциплінарної координації.

Щоб систематизувати підходи до оцінки та управління переробками, розглянемо таблицю 4.1.

Таблиця 4.1.

Типологія переробок у будівельних проєктах та їх вплив на ефективність
(розроблено автором на основі [64])

№	Тип переробки	Основна причина виникнення	Характер впливу	Потенційні наслідки
1	Позитивна	Оптимізація рішень, удосконалення якості	Покращення функціональності, підвищення цінності об'єкта	Задоволеність замовника, зміцнення репутації
2	Негативна	Помилки, неточності, відсутність координації	Збільшення вартості та термінів реалізації	Втрати ресурсів, зниження довіри, конфлікти
3	Проектна	Невірні розрахунки, зміни вимог	Переробка креслень, коригування технічних даних	Відтермінування будівельного циклу
4	Будівельна	Помилки на місці виконання робіт	Необхідність демонтажу чи виправлення	Витрати на матеріали, додатковий контроль
5	Адміністративна	Недоліки управління або документації	Втрата інформації, повторні узгодження	Неефективність управлінських процесів

Явище переробки є багатограним і охоплює як технічні, так і управлінські аспекти реалізації будівельного проєкту. Системний аналіз причин її виникнення дозволяє розглядати переробку не лише як негативне явище, а як індикатор організаційної зрілості проєкту — ступеня його здатності ефективно виявляти, коригувати та запобігати помилкам на всіх етапах життєвого циклу [23].

Для наочного розуміння наслідків проєктних помилок доцільно розглянути приклад типового просторового конфлікту в будівельній документації. На рисунку 4.3 показано ситуацію, коли невідповідність між архітектурним і конструктивним розділами проєкту призвела до накладання елементів — сходової клітки та несучої колони.

Одним із ключових аспектів аналізу ефективності будівельного проєкту є розуміння причин, що призводять до переробок (rework) — повторного виконання робіт через помилки, пропуски або зміни, які впливають на загальну якість, вартість і строки реалізації. Для ефективного управління цими процесами важливо розглядати переробку не лише як наслідок технічної помилки, а як індикатор системних недоліків управління інформацією, комунікацією та координацією між учасниками проєкту [63].

Однією з поширених форм неефективності є упущення (omission errors) — ситуації, коли певна частина системи (проєктування, будівництво чи виробництво) була

пропущена, що призвело до відхилень у кінцевому результаті. За визначенням Reason, такі помилки виникають у випадках, коли механізми контролю деформуються або коли відбувається відволікання уваги у процесі виконання завдання. Вони часто є наслідком перевантаження персоналу, недосконалих процедур перевірки або неузгодженості між етапами реалізації.



Рис. 4.3. Приклад неточності у проєктній документації, пов'язаної з розташуванням сходової клітки та колони (розроблено автором на основі [63])

Дослідження Love та співавторстві показало, що низька вартість проєктних робіт часто корелює з низькою якістю проєктної документації, що зумовлює появу значної кількості переробок уже на етапі будівництва [164]. Підрядники та субпідрядники також схильні до подібних помилок, оскільки стандарти якості, безпеки та екологічної відповідальності не завжди дотримуються належним чином. Це свідчить про необхідність не лише технічного, а й організаційного контролю, який би забезпечував узгодженість вимог на всіх рівнях управління.

Іншим важливим видом є зміни (changes) — цілеспрямовані дії, що змінюють початково встановлені параметри чи вимоги до проєкту. Такі зміни можуть стосуватися естетичних, функціональних або експлуатаційних характеристик об'єкта. Хоча зміни іноді підвищують якість кінцевого результату, вони часто мають негативний вплив на продуктивність і плановість процесів, оскільки вимагають корекції проєктної документації, узгодження додаткових робіт та перерозподілу ресурсів.

Найпоширенішою формою змін є замовлення на зміни (change orders), що вносяться замовником під час реалізації будівництва. Саме вони, за даними дослідження, становлять основне джерело переробок у будівельних проєктах, особливо при складних об'єктах інфраструктури.

У науковій літературі причини виникнення переробок описуються як результат комбінації інформаційної невизначеності та організаційних недоліків. Невизначеність може бути спричинена неякісною, суперечливою або неповною інформацією, що надходить між учасниками проєкту. Деякі дослідники підкреслюють, що вона має

системний характер, оскільки виникає з сукупності взаємопов'язаних факторів — людських, технічних і управлінських [160].

Palaneeswaran] звертає увагу на зовнішні фактори, що впливають на рівень переробок: надмірне робоче навантаження, обмежена кількість кваліфікованих працівників і тиск з боку інвесторів щодо дострокового завершення робіт. Такі обставини створюють умови для зниження контролю якості та підвищення ризику помилок [206].

Ефективність управління будівельними проєктами значною мірою визначається здатністю системи вчасно виявляти та мінімізувати переробки (rework) — повторне виконання робіт, що виникає через помилки, пропуски або зміни у процесах проєктування й реалізації. Переробки є не лише технічною проблемою, але й важливим індикатором управлінської надійності та якості комунікації між учасниками проєкту. Вони відображають ступінь інтегрованості процесів, ефективність інформаційних потоків і рівень контролю на всіх етапах життєвого циклу будівництва [137].

Системне вивчення причин і механізмів виникнення переробок дає змогу не тільки усунути поточні недоліки, а й запобігти їх повторенню в майбутніх проєктах. Для цього важливо класифікувати типові ситуації, у яких виникають відхилення, і визначити, які з них мають найбільший вплив на ефективність будівництва.

З метою узагальнення існуючих підходів і демонстрації різновидів факторів, що зумовлюють появу переробок, у таблиці 4.2 подано класифікацію основних причин їх виникнення в будівельних проєктах. Ця систематизація дозволяє структурувати джерела ризику за групами — від управлінських до технологічних, — що є підґрунтям для подальшого аналізу та розроблення механізмів їх мінімізації.

Таблиця 4.2.

Класифікація основних причин виникнення переробок у будівельних проєктах
(розроблено автором на основі [137])

№	Група причин	Типові приклади	Механізм виникнення	Потенційні наслідки
1	Пов'язані з власником	Часті зміни вимог, невизначеність бюджету, затримка рішень	Нестабільність управлінських рішень, відсутність комунікації з проєктною групою	Затримки у графіку, збільшення вартості, конфлікти
2	Пов'язані з проєктуванням	Неповна або суперечлива документація, недооцінка технічних ризиків	Недостатній контроль, поспіх у проєктуванні, слабка координація фахівців	Помилки у кресленнях, технічні дефекти, повторне узгодження
3	Пов'язані з будівництвом	Низька кваліфікація персоналу, недоліки субпідрядників, помилки виконання	Невідповідність стандартам якості, неузгодженість між командами	Необхідність демонтажу, втрати матеріалів, простої техніки

Серед найважливіших чинників, що спричиняють виникнення переробок у будівельних проєктах, особливу увагу привертають ті, які безпосередньо пов'язані з

власником (замовником), адже саме він задає стратегічний вектор реалізації проекту, формує очікування та визначає ресурси. Недостатня компетентність або обмежена залученість власника до процесу управління часто стає одним із ключових джерел помилок на всіх етапах життєвого циклу проекту.

До типових проблем цієї групи належать:

- відсутність у власника практичного досвіду в галузі проектування й організації будівництва;

- неповне або несвоєчасне фінансування;
- обмежена участь у процесі ухвалення управлінських рішень;
- недостатній інструктаж команди проекту;
- слабка взаємодія з консультантами та проєктантами;
- суперечливі положення в контрактній документації.

Ключовою причиною виникнення переробок є комунікаційний розрив між замовником і проєктною командою. Невчасна або нечітка передача інформації призводить до помилок, пропусків і невідповідностей у кресленнях і технічних специфікаціях. Для забезпечення якісного та своєчасного виконання робіт члени команди мають діяти в режимі постійної взаємодії, підтримуючи прозорість інформаційних потоків.

Особливої уваги потребує недостатня координація та інтеграція на етапі проектування. Коли кожен спеціаліст працює ізольовано, використовуючи власні технологічні інструменти, виникають системні розриви. Так, у дослідженні виявлено, що використання різних форматів проєктної документації (CAD-систем інженерами та ручних креслень архітекторами) призвело до численних неточностей, невідповідностей розмірів і пропущених елементів у проєктних матеріалах. Це свідчить про необхідність переходу до інтегрованих цифрових рішень, таких як BIM (Building Information Modeling), які дозволяють уникнути дублювання інформації й зменшити ризики помилок у координації [82].

Не менш важливу роль у формуванні причин переробок відіграють фактори, пов'язані з підрядниками. Їхня діяльність безпосередньо визначає якість виконання робіт і загальну ефективність будівельного процесу. Основними проблемами цієї категорії є:

- неефективна управлінська практика компаній-учасників;
- слабкий технічний нагляд;
- недбалість і неуважність працівників;
- недостатня кваліфікація персоналу;
- використання матеріалів низької якості;
- нераціональне планування робіт і розподіл ресурсів.

Генеральний підрядник у цьому контексті відіграє центральну роль — саме від його організаційної спроможності залежить рівень координації, ефективність інформаційного обміну між командами та загальний успіх проєкту.

Своє бачення систематизації факторів переробок запропонувала Construction Owners Association of Alberta (COAA), що розробила класифікацію основних категорій причин. Цей підхід дозволяє комплексно оцінити вплив людського, технічного та управлінського чинників на виникнення повторних робіт і визначити напрями вдосконалення системи управління [65].

Запропонована структура демонструє, що переробки в будівництві є багатофакторним процесом, у якому технічні, людські та організаційні чинники діють у

взаємозв'язку. Розуміння цієї системної природи дозволяє створювати адаптивні стратегії управління якістю, засновані на запобіганні помилкам, інтеграції цифрових інструментів і підвищенні рівня комунікаційної взаємодії всіх учасників проєкту.

Фактор людського потенціалу є одним із найсуттєвіших елементів, що визначає рівень якості та ефективності реалізації будівельного проєкту. Від кваліфікації, досвіду та компетентності працівників безпосередньо залежить частота виникнення переробок. Серед головних причин цього типу відхилень дослідники виділяють: недостатній технічний нагляд, відсутність досвідчених керівників, низький рівень кваліфікації персоналу, нечіткі або суперечливі інструкції, перевантаження працівників, неналежне планування графіків робіт, слабкий контроль якості та неефективне управління матеріальними ресурсами.

У будівельному середовищі ці чинники доповнюються такими викликами, як варіативність умов виробництва, коливання якості матеріалів, постійні зміни конструктивних рішень, обмеження потужностей і ресурсів. Відтак людський потенціал розглядається не лише як ресурс, а як стратегічний чинник успіху, що формує стабільність і передбачуваність результатів.

Для кращого розуміння структури та взаємозв'язку факторів, що призводять до виникнення переробок у будівельних проєктах, доцільно представити їх у вигляді рисунка 4.4. Такий підхід дозволяє не лише систематизувати причини, але й побачити, як різні категорії впливають одна на одну в межах єдиної управлінської системи.

Запропонована нижче текстова блок-схема відображає логіку класифікації, розробленої Construction Owners Association of Alberta (COAA), де переробки розглядаються як результат взаємодії п'яти ключових груп чинників: людського потенціалу, лідерства і комунікацій, інжинірингу, планування, а також поставки матеріалів і устаткування.

Досвідчені та висококваліфіковані керівники відіграють критично важливу роль у мінімізації переробок. Їхня здатність прогнозувати ризики, забезпечувати комунікацію між учасниками процесу та контролювати якість на кожному етапі реалізації є ключем до створення ефективної організаційної культури. Сучасний менеджер будівельного проєкту повинен виступати не лише координатором дій, а й агентом інновацій — сприяти запровадженню технологічних і управлінських рішень, що зменшують кількість повторних робіт і підвищують якість кінцевого продукту.

Інший критичний аспект — лідерство та комунікації. Переробки, пов'язані з управлінськими помилками, найчастіше виникають через неефективну систему прийняття рішень, недостатню взаємодію між членами команди, відсутність чіткої структури управління та контролю. Проблеми лідерства проявляються у вигляді слабкої координації, формального контролю якості, відсутності стратегічного бачення та низької мотивації виконавців.

Як зазначають, принципи системного управління якістю все ще недостатньо інтегровані у практику управління будівельними проєктами. Це призводить до того, що переробки часто сприймаються як невідворотна складова процесу, а не як показник управлінських недоліків. Така позиція формує замкнене коло неефективності: повторні роботи знижують продуктивність, спричиняють перевитрати ресурсів і негативно впливають на рівень задоволення замовника [203].

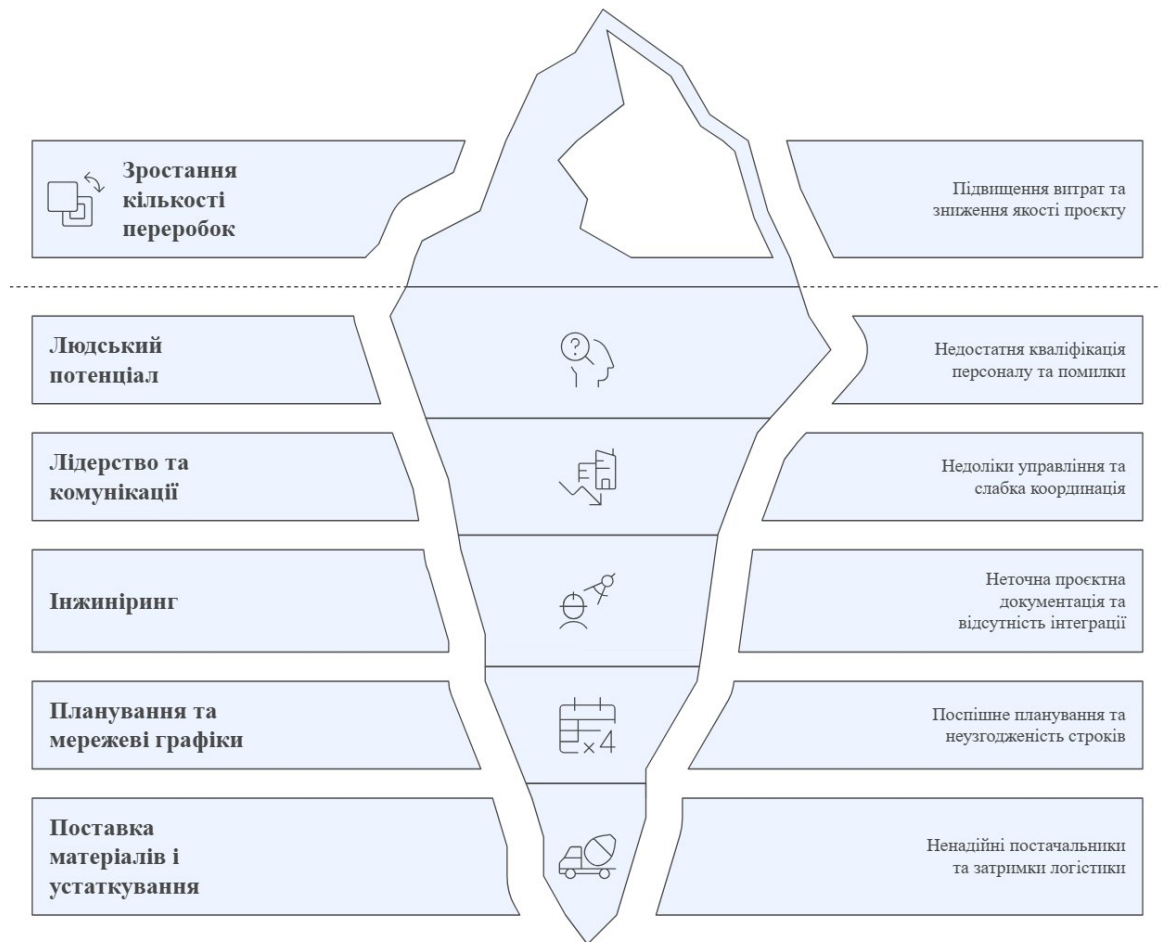


Рис. 4.4. Структурна класифікація причин переробок за системою СОАА
(розроблено автором на основі [65])

Слабке лідерство, у поєднанні з неефективними комунікаційними каналами, призводить до використання невідповідних технологій, помилок у плануванні та недостатнього контролю процесів. У свою чергу, це формує системну нестабільність і підвищує ризик виникнення переробок.

Важливу роль у запобіганні цьому відіграє інформаційна взаємодія між учасниками проєкту. Керівники проєктів повинні підтримувати безперервний обмін інформацією, забезпечувати узгодженість цілей та швидке реагування на зміни. Успішний менеджер — це не лише контролер виконання, а й комунікаційний модератор, який створює умови для ефективної взаємодії всіх учасників проєктної екосистеми.

Однією з головних функцій сучасного лідера є балансування між ключовими параметрами проєкту — якістю, часом, вартістю та обсягом робіт. Як зазначають дослідники, керівник проєкту повинен не тільки виявляти та усувати причини переробок, але й формувати систему моніторингу, що дозволяє в режимі реального часу відстежувати відхилення і приймати управлінські рішення на основі даних.

Для глибшого розуміння взаємозв'язку між людськими, управлінськими та комунікаційними чинниками, що впливають на виникнення переробок у будівельних проєктах, доцільно узагальнити їх у системній формі

Як показують результати досліджень, недоліки в організації людського ресурсу й управлінських процесів мають комплексний ефект: вони не лише знижують продуктивність, а й збільшують кількість повторних робіт, порушують графік виконання та спричиняють перевитрати. У цьому контексті таблиця 4.3 відображає структурний зв'язок між групами факторів, їх основними проявами, механізмами впливу та можливими заходами мінімізації наслідків.

Таблиця 4.3.

Взаємозв'язок факторів людського потенціалу та управлінських комунікацій у виникненні переробок *(розроблено автором на основі [203])*

№	Група факторів	Основні прояви	Механізм впливу на переробки	Потенційні заходи мінімізації
1	Людський потенціал	Недосвідчені керівники, неувважність, нестача кваліфікації, нечіткі інструкції	Помилки у виконанні робіт, відхилення від стандартів, повторне виконання операцій	Підвищення кваліфікації, навчання, посилення контролю якості
2	Управлінська культура	Формальний підхід до управління якістю, слабе лідерство, відсутність інновацій	Підвищення кількості помилок, відсутність ініціативності працівників	Впровадження системи TQM, розвиток лідерських навичок
3	Комунікації в команді	Нечітка передача інформації, конфлікти між учасниками, відсутність узгоджених каналів	Дублювання дій, втрати інформації, несвоєчасне реагування на зміни	Використання цифрових платформ (BIM, CDE), регулярні координаційні наради
4	Організаційна структура	Відсутність координації, неузгодженість ролей і відповідальності	Неповні або помилкові рішення, затримки в прийнятті рішень	Оптимізація структури управління, інтеграція командного підходу
5	Контроль і моніторинг	Недостатній технічний нагляд, відсутність системи аналітики	Пізнє виявлення дефектів, повторні перевірки	Впровадження цифрового моніторингу якості, аналітичні звіти в реальному часі

Наведена систематизація дозволяє побачити, що більшість переробок виникають не лише через технічні помилки, а й через управлінську дезінтеграцію — коли бракує лідерства, комунікаційної узгодженості та внутрішнього контролю. Саме тому аналіз людського потенціалу та якості управління є ключем до формування ефективних стратегій запобігання переробкам.

Людський потенціал та управлінське лідерство виступають центральними складовими успішного управління проектом. Їх взаємозв'язок визначає здатність організації запобігати виникненню переробок через проактивне планування, ефективну

комунікацію та формування культури якості. Без належного розвитку цих компонентів жодна технологічна або методологічна інновація не здатна повністю усунути ризики неефективності в будівельному процесі.

Серед головних чинників, що спричиняють виникнення переробок, окреме місце займають інжинірингові причини, які охоплюють як технічні, так і організаційні аспекти діяльності проєктних груп. Неефективна взаємодія між інженерами, архітекторами та іншими учасниками розробки документації часто стає основним джерелом помилок, що згодом трансформуються у повторні роботи під час будівництва.

До найбільш поширених інжинірингових чинників належать: втрата виробничого ритму, неадекватна професійна підготовка проєктантів, невиправдані обіцянки щодо якості, відсутність ефективної координації та інтеграції між різними фаховими підсистемами. Важливу роль відіграють також помилкові або надмірні очікування замовників, які створюють тиск на проєктантів, змушуючи їх вдаватися до компромісів у плануванні або прийнятті технічних рішень.

З іншого боку, помилки проєктувальників можуть бути результатом недостатнього розуміння вимог клієнта, невірної інтерпретації функціональних потреб або несвоечасного уточнення технічних параметрів. Відсутність інтегрованого середовища для обміну даними між проєктними командами (наприклад, недостатнє використання BIM або систем спільного доступу до інформації) призводить до дублювання, втрати даних і появи суперечливих креслень.

Ще одним ключовим джерелом помилок є планування будівництва та побудова мережових графіків. У багатьох випадках переробки виникають через недостатній рівень деталізації або поспішність планування, коли на підготовчій етапі проєктування відводиться замало часу перед початком фізичного виконання робіт. Така ситуація зумовлює подальші труднощі у координації процесів, порушення термінів і збільшення витрат.

Нерідко окремі причини взаємопов'язані між собою і формують ланцюгову реакцію відхилень. Наприклад, невдале управлінське рішення недосвідченого керівника, який неправильно обрав технологію зведення об'єкта, автоматично впливає на якість виконання робіт і підвищує ризик необхідності подальших виправлень.

Для більш глибокого розуміння природи переробок було проведено опитування серед представників будівельних підприємств з метою ідентифікації основних чинників, що впливають на їх виникнення. Дослідження здійснювалося за допомогою структурованої анкети, розробленої у трьох варіантах — для власників, проєктантів і виконавців робіт, що дозволило отримати багатоперспективне бачення проблеми [89].

Основою методики дослідження стала Шкала Лайкерта (Likert scale), яка використовується для вимірювання ступеня згоди або незгоди респондентів із наведеними твердженнями. Кожен учасник опитування мав обрати один із п'яти варіантів оцінки:

- 1 — Повністю не згоден
- 2 — Не згоден
- 3 — Частково згоден / нейтральна позиція
- 4 — Згоден
- 5 — Повністю згоден

Отримані результати дали змогу кількісно оцінити вплив кожного типу факторів на загальний рівень переробок і визначити пріоритетні напрями для вдосконалення управління.

Для того щоб узагальнити результати аналізу та продемонструвати системний характер факторів, які призводять до виникнення переробок у будівельних проєктах, доцільно подати їх у вигляді структурної моделі. Такий формат дозволяє візуально відобразити логіку формування переробок — від технічних та організаційних причин до управлінських і комунікаційних чинників, які посилюють або взаємно зумовлюють один одного.

Рисунок 4.5 відображає ключові етапи формування проблеми переробок у будівельному процесі, а також демонструє взаємозв'язок між інжиніринговими, організаційно-планувальними та комунікаційно-управлінськими складовими. Вона ґрунтується на результатах анкетного дослідження, проведеного серед трьох основних груп учасників проєктів — власників, проєктантів і виконавців робіт, що дозволяє комплексно оцінити вплив кожного фактору на якість і ритмічність будівельного процесу.

Таким чином, наведена схема не лише ілюструє структуру причин переробок, але й підкреслює важливість інтеграції управлінських, інформаційних і технічних рішень для забезпечення узгодженості між усіма сторонами проєкту.

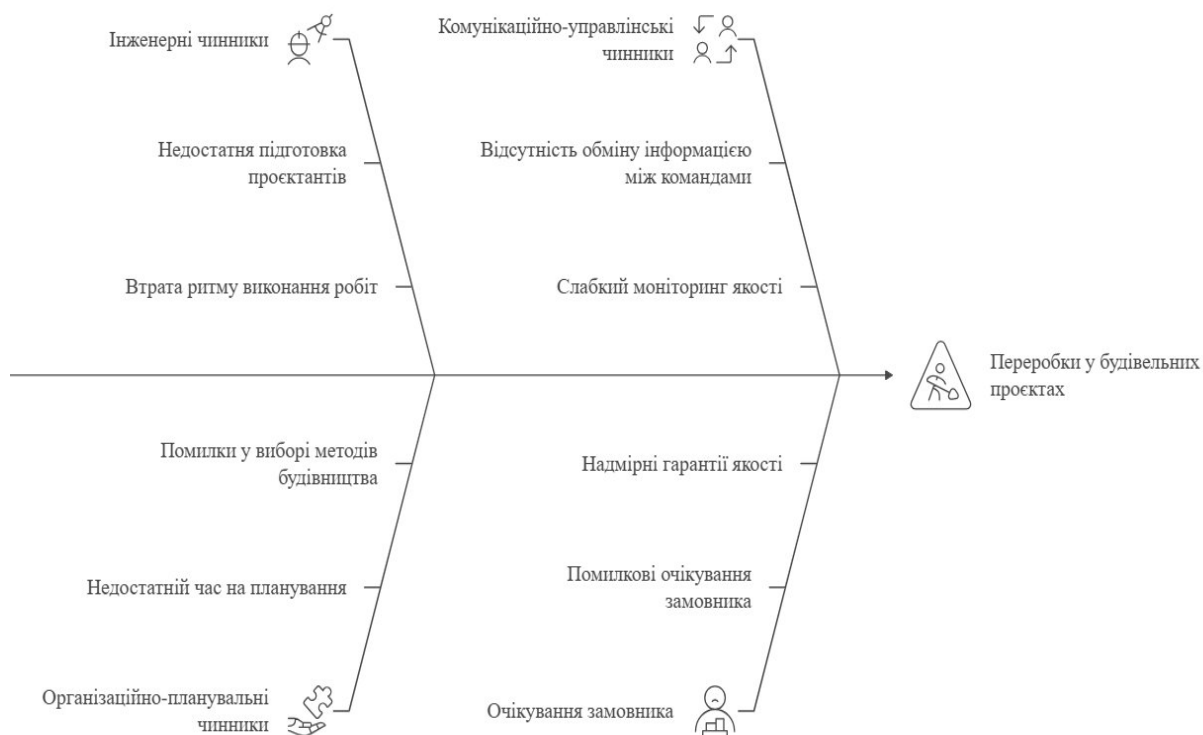


Рис. 4.5. Структурна модель основних причин виникнення переробок у будівельному проєкті (розроблено автором на основі [89])

Проведене дослідження підтверджує, що переробки у будівництві мають комплексну природу, де технічні, організаційні та людські фактори взаємопов'язані. Найбільший вплив мають інжинірингові похибки та недоліки планування, посилені браком координації між командами. Системне застосування цифрових технологій,

розширення комунікаційних каналів і підвищення кваліфікації спеціалістів дозволяє зменшити кількість помилок та створити більш передбачуване, інтегроване середовище реалізації будівельних проєктів.

Можна стверджувати, що проблема переробок у будівельних проєктах має багатовимірний характер і відображає не лише технічні недоліки чи помилки проєктування, а й глибші управлінські, організаційні та комунікаційні дисфункції системи. Переробка виступає своєрідним індикатором якості управління знаннями, взаємодії учасників проєкту та ефективності інформаційних процесів у межах інженерно-будівельного середовища.

Виявлено, що на виникнення переробок суттєво впливають три групи чинників: людські, організаційно-технічні та інформаційно-комунікаційні. Людський потенціал є базовою передумовою ефективності — від рівня кваліфікації, досвіду, відповідальності та професійної культури працівників безпосередньо залежить імовірність появи помилок. Недостатня підготовка, перевантаження персоналу, нечіткі інструкції та неефективне лідерство призводять до повторного виконання робіт, втрати часу та перевитрат ресурсів.

Організаційно-технічна складова охоплює проблеми планування, інжинірингу та координації. Неповна або суперечлива проєктна документація, поспішне планування, відсутність інтеграції між учасниками та використання різних форматів даних створюють передумови для накопичення технічних дефектів і порушень логістики виконання. Водночас сучасні цифрові технології, зокрема інтегровані платформи управління будівництвом і системи інформаційного моделювання (BIM), довели свою ефективність у зменшенні кількості переробок за рахунок підвищення точності, узгодженості та прозорості даних.

Важливим чинником є також якість комунікацій і управлінського лідерства. Відсутність чітких каналів обміну інформацією, слабкий зворотний зв'язок між замовником, проєктантами та виконавцями, формальний контроль якості — усе це призводить до втрати синхронності дій і збільшення кількості відхилень. Розвинена культура комунікації, навпаки, створює умови для узгодження рішень, оперативного реагування на зміни й попередження помилок ще на ранніх стадіях.

Підсумовуючи, можна зазначити, що ефективне зменшення переробок можливе лише за умови системного підходу, який поєднує професіоналізацію кадрів, оптимізацію управлінських процесів, впровадження цифрових інструментів та формування партнерської культури взаємодії. Переробки не є випадковим явищем — вони відображають рівень організаційної зрілості, здатність до навчання і гнучкості системи управління проєктом. Тому завдання сучасного менеджменту полягає не лише у виправленні помилок, а у створенні такого середовища, де самі передумови їх виникнення зводяться до мінімуму.

4.3. Аналіз впливу змін проєктних параметрів на когнітивну стабільність системи

Синергетичний ефект, який виникає в процесі інтегрованої реалізації будівельного проєкту із застосуванням технологій інформаційного моделювання (BIM), є результатом взаємодії технічних, організаційних та управлінських чинників, що формують якісно новий рівень ефективності проєктного середовища. Його поява зумовлена не лише

технологічними перевагами цифрових інструментів, а й здатністю цих інструментів забезпечити узгодженість дій усіх учасників, створити прозорий інформаційний простір і підвищити точність управлінських рішень.

До ключових складових такого ефекту належать [232]:

1. Зменшення кількості технічних помилок і колізій, які традиційно виникають унаслідок неузгодженості між окремими частинами проєкту.
2. Скорочення загальних термінів реалізації проєкту завдяки синхронізації дій між учасниками, використанню спільних цифрових середовищ та автоматизації погоджень.
3. Оптимізація транзакційних витрат через усунення дублювання процесів, зниження витрат на перевірку документації й скорочення часу ухвалення рішень.
4. Зниження експлуатаційних витрат будівлі завдяки точності даних, які формуються в BIM-моделі, і можливості їхнього використання для управління об'єктом після введення його в експлуатацію.

Одним із найважливіших проявів синергетичного ефекту є зменшення кількості помилок у проєктуванні. Завдяки впровадженню BIM-технологій можливо здійснювати автоматичне виявлення просторових і технічних колізій між елементами моделі ще до початку будівництва. Це дозволяє проєктувальникам завчасно виявити й усунути невідповідності, які в іншому випадку могли б перерости у дороговартісні виправлення на етапі будівельно-монтажних робіт. Відтак якість проєктної документації значно зростає, а ризик виникнення повторних дій або конфліктів між системами мінімізується.

Типові колізії, які найчастіше зустрічаються в традиційному проєктуванні, стосуються невідповідності конструктивних елементів інженерним системам — наприклад, перекриття без технологічних отворів, помилкові геометричні рішення чи неправильний розрахунок обсягів матеріалів. Завдяки тривимірному моделюванню в BIM-середовищі всі ці аспекти можуть бути перевірені автоматично, що не лише підвищує якість планування, але й зменшує кількість витрат, пов'язаних із неузгодженістю даних між підрядниками, інженерами та замовниками [101].

Не менш суттєвим є ефект скорочення часу реалізації проєкту, який досягається через цифрову інтеграцію учасників у межах спільного інформаційного простору. Єдина база даних і використання CDE (Common Data Environment) дозволяють виконувати паралельні процеси погодження, спрощують комунікацію та усувають часові втрати, характерні для паперових або розрізнених цифрових форматів. У результаті відбувається скорочення строків не лише на проєктування, а й на узгодження, внесення змін і прийняття рішень під час будівництва.

Ефект прискорення проявляється на кількох рівнях [75]:

- зменшення часу на підготовку технічної та проєктної документації;
- оптимізація термінів, необхідних для коригування та повторного погодження рішень;
- прискорення процедур узгодження з інвесторами та контролюючими структурами завдяки уніфікованим форматам подання даних;
- підвищення оперативності управління змінами безпосередньо на будівельному майданчику.

Для систематизації основних напрямів впливу інтеграції методів IPD та BIM на результативність будівельних проєктів доцільно узагальнити ключові складові

синергетичного ефекту у вигляді структурної таблиці. Такий формат дозволяє чітко простежити, яким чином поєднання технологічних і управлінських інновацій формує комплексні переваги, що охоплюють усі етапи життєвого циклу будівлі — від проєктування до експлуатації.

Таблиця 4.4 демонструє взаємозв'язок між чинниками синергії, механізмами їх реалізації та очікуваними результатами, які проявляються у вигляді підвищення точності проєктних рішень, скорочення термінів виконання, оптимізації витрат і покращення комунікаційної взаємодії між учасниками. Представлена систематизація дозволяє не лише кількісно оцінити вплив інтегрованих технологій на ефективність проєктів, а й якісно визначити, які саме управлінські практики створюють основу для виникнення синергетичного ефекту.

Таблиця 4.4.

Комплексні прояви синергетичного ефекту в інтегрованих будівельних проєктах
(розроблено автором на основі [75])

№	Складова синергетичного ефекту	Механізм реалізації	Очікуваний результат
1	Зменшення кількості технічних помилок	Автоматизований аналіз BIM-моделі, перевірка колізій	Підвищення якості проєктної документації, скорочення обсягу переробок
2	Скорочення термінів виконання робіт	Координація дій у спільному цифровому середовищі	Зменшення часу на погодження, підвищення ритмічності робіт
3	Зниження трансакційних витрат	Впровадження єдиної інформаційної платформи	Зменшення кількості адміністративних процедур, оптимізація управлінських рішень
4	Підвищення узгодженості процесів	Інтеграція даних між архітекторами, інженерами й підрядниками	Зниження ризику дублювання інформації, поліпшення комунікації
5	Оптимізація експлуатаційних витрат	Використання цифрової моделі на етапі експлуатації	Підвищення енергоефективності, спрощення технічного обслуговування

Синергетичний ефект від інтеграції методів IPD і BIM — це не лише зростання ефективності окремих етапів проєкту, а формування єдиної когнітивно-інформаційної екосистеми, де знання, технології та управління діють у тісній взаємодії. Завдяки цьому будівельний процес перетворюється на адаптивну систему, здатну не лише реагувати на зміни, а й передбачати їх, забезпечуючи стабільність, передбачуваність і стійкий розвиток усього проєктного середовища.

Будівельні проєкти, особливо масштабні та багатозадачні, відзначаються високим рівнем динамічності, що неминуче зумовлює внесення змін на різних етапах їх реалізації. Такі зміни, або переробки, можуть проявлятися у вигляді перевитрат часу, додаткових фінансових витрат, збільшення потреби у трудових і матеріальних ресурсах, а також

порушення встановлених графіків виконання робіт. У деяких випадках це призводить до скорочення обсягу запланованих робіт, зниження якості кінцевого продукту чи навіть до втрати узгодженості між різними підрозділами, що беруть участь у реалізації проєкту [132].

Наслідки переробок мають системний характер. Вони не лише підвищують витрати на виконання робіт, але й знижують прибутковість, конкурентоспроможність і репутацію компаній. В окремих випадках накопичення неузгоджених змін призводить до перевитрати ресурсів, зриву термінів здачі об'єкта, конфліктів між учасниками та навіть до судових позовів. Це створює негативний імідж компанії і може знизити її довіру на ринку.

Прямі наслідки переробок виражаються у додаткових витратах робочої сили, матеріалів, машин і механізмів, а також у втраті продуктивності. Проте не менш суттєвими є непрямі наслідки, пов'язані зі зниженням морального стану працівників, виникненням організаційних конфліктів та втратою мотивації. Будівельні компанії, що часто стикаються з подібними явищами, зазвичай мають підвищений рівень плинності кадрів і зменшення ефективності управлінських рішень.

Дані міжнародних досліджень свідчать, що прямі витрати на переробки у будівництві можуть перевищувати 10% від загальної вартості проєкту. Якщо екстраполювати цю частку на річний обсяг ринку будівництва, стає очевидним, що масштаб економічних втрат є колосальним. Подібні показники демонструють, що навіть незначне підвищення точності проєктування чи якості управління може призвести до суттєвого зменшення фінансових втрат на галузевому рівні [377].

Більшість попередніх досліджень фокусувалися переважно на кількісній оцінці витрат, не аналізуючи глибинні причини, які формують умови для їх виникнення. Унаслідок цього управлінські рішення часто спрямовувалися на усунення зовнішніх проявів неефективності, а не на ліквідацію її структурних джерел. Для досягнення системного ефекту необхідно вивчати внутрішні механізми формування переробок, їхню взаємодію з процесами управління, комунікації та контролю якості.

Попри складність обчислення реальних втрат, спричинених переробками, стає дедалі очевидніше, що їх моніторинг і оцінювання повинні стати невід'ємною частиною системи управління проєктами. Переробки мають як прямий (фінансовий), так і опосередкований (організаційно-психологічний) вплив на результативність будівництва. У разі неефективного управління вони можуть не лише нівелювати запланований прибуток, а й перевищити його, перетворюючи проєкт на збитковий.

Крім того, негативний вплив переробок виходить за межі економічних параметрів. Вони торкаються репутаційних ризиків, стосунків між партнерами, рівня довіри інвесторів і задоволеності клієнтів. Одним із найпоширеніших наслідків є перевитрата коштів — ситуація, коли фактична вартість проєкту перевищує первинно заплановані обсяги фінансування. Такі випадки є типовими не лише для країн, що розвиваються, але й для розвинених ринків, де складність координації учасників та обсяг управлінських рішень постійно зростають.

Для більш глибокого розуміння характеру впливу переробок на ефективність реалізації будівельних проєктів доцільно представити їхню структуру у вигляді логічної моделі. Такий підхід дозволяє простежити послідовність переходу від окремої зміни або помилки до комплексних економічних, організаційних і стратегічних наслідків.

Рисунок 4.6 відображає причинно-наслідковий ланцюг формування впливу переробок: від моменту внесення змін до проекту — через безпосередні витрати часу, ресурсів і якості — до віддалених ефектів, що проявляються у зниженні прибутковості, порушенні репутації компанії та втраті конкурентних позицій на ринку [163].



Рис. 4.6. Механізм впливу переробок на ефективність реалізації будівельного проекту (розроблено автором на основі [163])

Переробки є не просто наслідком технічних або управлінських помилок, а індикатором зрілості системи управління проектом. Вони відображають, наскільки ефективно налагоджені процеси контролю, комунікації та координації між учасниками. Зменшення їх кількості можливе лише за умови переходу до інтегрованої моделі управління, де зміни прогнозуються, обґрунтовуються і контролюються в реальному часі, а не усуваються постфактум.

У сучасній науковій та професійній літературі дедалі частіше наголошується, що переробки в будівництві є не випадковим явищем, а закономірним наслідком складності, багатоступеневості й високої взаємозалежності процесів, які формують будівельний проєкт. Саме багатовекторна природа будівництва — з його численними учасниками, послідовними фазами, великою кількістю технічних рішень і змін у середовищі реалізації — створює передумови для появи повторних робіт. Багато аналітиків вважають, що переробки є відображенням внутрішньої складності проєктного середовища, у якому одночасно взаємодіють різні види знань — інженерних, управлінських, економічних і соціальних. Вони наголошують, що помилки або відхилення не завжди є результатом некомпетентності чи недбалості, а часто виникають унаслідок суперечностей між цілями, часовими рамками та ресурсними обмеженнями [378].

Для систематизації цього явища доцільно розрізнити два ключові типи переробок — проєктні та будівельні, кожен із яких має власну природу, джерела виникнення та управлінські наслідки. Це подано нижче у вигляді рисунка 4.7.



Рис. 4.7. Класифікація причин переробок у будівельних проєктах та їх вплив на витрати (розроблено автором на основі [378])

Проєктні переробки виникають переважно на етапі розроблення проєктної документації та є наслідком змін у специфікаціях, помилок у конструктивних рішеннях, недосконалості технічних даних або недостатньої взаємодії між архітекторами, інженерами та замовником. Такі помилки, навіть виявлені на ранніх стадіях, можуть

призвести до суттєвого збільшення вартості, особливо якщо вони впливають на ключові елементи проєкту.

Будівельні переробки, натомість, формуються на етапі виконання робіт і часто є наслідком помилок організаційного характеру — неузгодженості між виконавцями, порушення послідовності технологічних операцій, недостатнього контролю якості чи несвоєчасного оновлення документації. Такі випадки особливо критичні, оскільки виправлення вже виконаних робіт потребує значних матеріальних і часових ресурсів, що може призвести до подовження строків будівництва [361].

Досвід низки європейських досліджень підтверджує, що найбільш витратними причинами переробок залишаються людський фактор, дефіцит координації між підрозділами, а також часті зміни, ініційовані замовниками без урахування їхніх наслідків. Так, у результаті аналізу кількох десятків будівельних об'єктів було встановлено, що понад половина втрат, спричинених переробками, виникає саме на етапі виконання робіт, тоді як проєктна фаза формує лише передумови цих проблем.

Водночас досвід практичного застосування інформаційного моделювання (BIM) засвідчує, що завдяки інтегрованому цифровому підходу можна значно зменшити кількість колізій, забезпечити узгодженість рішень і тим самим мінімізувати ймовірність повторних робіт. Це підтверджує необхідність розгляду переробок не як неминучої складової будівельного процесу, а як керованого ризику, який можна зменшити за рахунок системної взаємодії технологій, комунікацій і управлінських процедур [41].

Незважаючи на те, що переробки визнані одним із найсуттєвіших чинників перевищення бюджету та затримок у реалізації будівельних проєктів, їх кількісна оцінка і досі залишається складним завданням для аналітиків і практиків галузі. Це пов'язано насамперед із різноманіттям підходів до визначення поняття “переробка”, відмінностями у методології досліджень та відсутністю уніфікованих систем обліку таких витрат у різних країнах і компаніях. Через це навіть у межах одного ринку показники можуть суттєво коливатися, що ускладнює порівняння та формування стандартів ефективності.

Складність збору достовірних даних пояснюється також тим, що переробки не завжди відображаються в офіційних фінансових звітах — часто їх “маскують” під додаткові роботи, зміни обсягів, модифікації технічних рішень або позапланові виплати підрядникам. До того ж, деякі компанії свідомо не ведуть окремого обліку витрат на доопрацювання, розглядаючи їх як невід’ємну частину процесу будівництва. Це призводить до заниження реальних масштабів проблеми і, відповідно, недооцінки потенційних економічних втрат.

Попри ці труднощі, низка досліджень дає змогу отримати орієнтовні показники, які демонструють масштаб впливу переробок на економіку будівництва. Так, за результатами багаторічних досліджень, проведених у різних країнах, встановлено, що середній рівень витрат на переробки може коливатися у межах від 2% до 15% загальної вартості проєкту залежно від типу об'єкта, його складності та якості управління.

У житловому, комерційному та промисловому будівництві ці показники, за даними низки дослідників, становлять від 2,3% до 9,4% від загальної вартості робіт. Інші автори наводять ще ширші межі — від 2% до 12%, підкреслюючи, що реальні витрати залежать від ступеня контролю якості та кваліфікації учасників. При цьому зафіксовано, що в будівництві нових об'єктів середній рівень переробок сягає 5,29%, а при реконструкції — близько 3,23%.

На великих промислових і інфраструктурних проєктах, де складність процесів і кількість учасників зростають, відсоток витрат, пов'язаних із доопрацюваннями, може бути значно вищим — до 12,4% і навіть 16,5% від вартості контракту. Це свідчить, що масштаб і складність проєкту прямо пропорційно впливають на ймовірність виникнення переробок і, відповідно, на їх фінансові наслідки [134].

Для наочного узагальнення результатів різних емпіричних досліджень щодо фінансових наслідків переробок у будівельних проєктах наведено таблицю 4.5, яка відображає діапазон витрат, типи проєктів і характер отриманих даних у працях провідних дослідників галузі.

Таблиця 4.5.

Порівняльний аналіз результатів досліджень витрат на переробки у будівельних проєктах *(розроблено автором на основі [134])*

№	Автор(и) дослідження	Тип проєктів	Діапазон витрат на переробки (%)	Коротка характеристика
1	Йозефсон, Хаммарлунд	Житлові, промислові, комерційні	2,3 – 9,4	Аналіз понад 200 будівельних проєктів у Скандинавії
2	Фаск та співавт.	Загальне будівництво	2 – 12	Порівняння різних методів управління якістю
3	Ойєсвобі та співавт.	Нове будівництво / реконструкція	5,29 / 3,23	Аналіз 50 компаній у будівельному секторі Нігерії
4	Бураті та співавт.	Промислові об'єкти	12,4	Дослідження дев'яти великих інженерних проєктів у США
5	Джонсон та ін.	Інфраструктурні проєкти	11,07 – 16,5	Статистичний аналіз транспортних і енергетичних об'єктів

Зіставлення результатів, наведених у таблиці, дозволяє зробити висновок, що незалежно від країни чи типу проєкту, переробки становлять відчутну частку загальної вартості будівництва, а отже, мають значний вплив на фінансову стійкість галузі. Водночас вимірювання самих витрат є лише початковим етапом на шляху до оптимізації процесів.

Для того щоб зменшити частку повторних робіт і підвищити ефективність використання ресурсів, будівельні компанії мають запроваджувати системи управління якістю, які не лише контролюють відповідність робіт стандартам, а й аналізують глибинні причини відхилень. Регулярна оцінка витрат, пов'язаних із переробками, дозволяє отримати нові знання про «слабкі місця» у проєктному циклі та дає змогу своєчасно коригувати стратегії управління.

Крім того, витрати на переробки безпосередньо залежать від ступеня впровадження інноваційних методів управління. Використання BIM, Lean-технологій та інтегрованих цифрових платформ сприяє ранньому виявленню колізій, прозорому контролю змін і створенню середовища, у якому якість стає не лише вимогою, а й економічно вигідною стратегією розвитку.

Аналіз узагальнених результатів, наведених у таблиці, дає підстави стверджувати, що переробки є стабільним і суттєвим чинником зростання витрат у будівельних проєктах, незалежно від регіону, економічного рівня країни чи типу спорудження [372]. Вони виступають не лише технічним відхиленням у процесі реалізації проєкту, а й маркером організаційної зрілості галузі, що виявляє її здатність до планування, контролю та взаємодії.

Проблема полягає не стільки в самих витратах, скільки в обмеженій прозорості процесів, які їх породжують. У більшості компаній переробки трактуються як природний елемент виробничого циклу, а не як системна помилка, що підлягає аналізу. Це призводить до втрати зворотного зв'язку — механізму, який дозволяє виявити й нейтралізувати першопричини відхилень. Таким чином, вимірювання витрат на переробки слід розглядати не як статистичну процедуру, а як інструмент стратегічного управління знаннями у межах корпоративної системи якості.

Щоб зменшити рівень повторних робіт, необхідно впроваджувати інтегровані моделі управління якістю, орієнтовані не лише на контроль, а й на випереджувальну діагностику. Такі моделі дають змогу не просто реєструвати помилки, а й оцінювати їх потенційний вплив на проєкт, здійснювати прогнозування ризиків і застосовувати превентивні заходи. В цьому контексті особливого значення набуває інформаційне моделювання (BIM), що поєднує управлінську аналітику, інженерну точність і когнітивні методи прогнозування.

Сучасні системи управління якістю у будівництві дедалі більше орієнтуються на інтелектуальні підходи — такі як Lean Construction, Six Sigma або Data-Driven Decision Making. Вони створюють умови для гнучкого коригування процесів, зменшення втрат і підвищення рівня комунікацій між усіма учасниками проєкту (рис. 4.8) [136].

Для кращого розуміння взаємозв'язку між витратами на переробки, управлінськими рішеннями та технологічними підходами нижче наведено рисунок 4.8, що відображає логіку взаємодії ключових чинників.

Як видно зі схеми, перехід до проактивної моделі управління якістю дозволяє розглядати переробки не як неминучі втрати, а як індикатор ефективності організації. Використання інтегрованих технологій — зокрема BIM — забезпечує повну прозорість процесів, підвищує узгодженість між підрядниками та сприяє усуненню колізій ще до етапу фізичного будівництва. Системний підхід до контролю якості й управління змінами перетворює негативний досвід переробок на джерело стратегічного вдосконалення, що підвищує стійкість будівельних компаній, оптимізує ресурси та створює основу для формування культури постійного вдосконалення у галузі.

Можна стверджувати, що інтеграція методів IPD (Integrated Project Delivery) та BIM (Building Information Modeling) у єдину когнітивну модель формує нову парадигму управління будівельними проєктами, засновану на взаємодії, прозорості та інтелектуальному обміні даними. Ця модель змінює не лише технічний рівень організації робіт, а й саму логіку управлінського мислення, де ключовими стають координація, спільна відповідальність і проактивне прийняття рішень.

Синергетичний ефект, що виникає внаслідок поєднання цифрових технологій і колективних управлінських стратегій, виявляється у скороченні кількості помилок, зменшенні витрат, підвищенні якості документації та ефективності комунікацій. Такий підхід дозволяє не просто автоматизувати процеси, а трансформувати їх у систему

когнітивної взаємодії, де рішення формуються на основі аналітики, прогнозів та адаптивних алгоритмів.

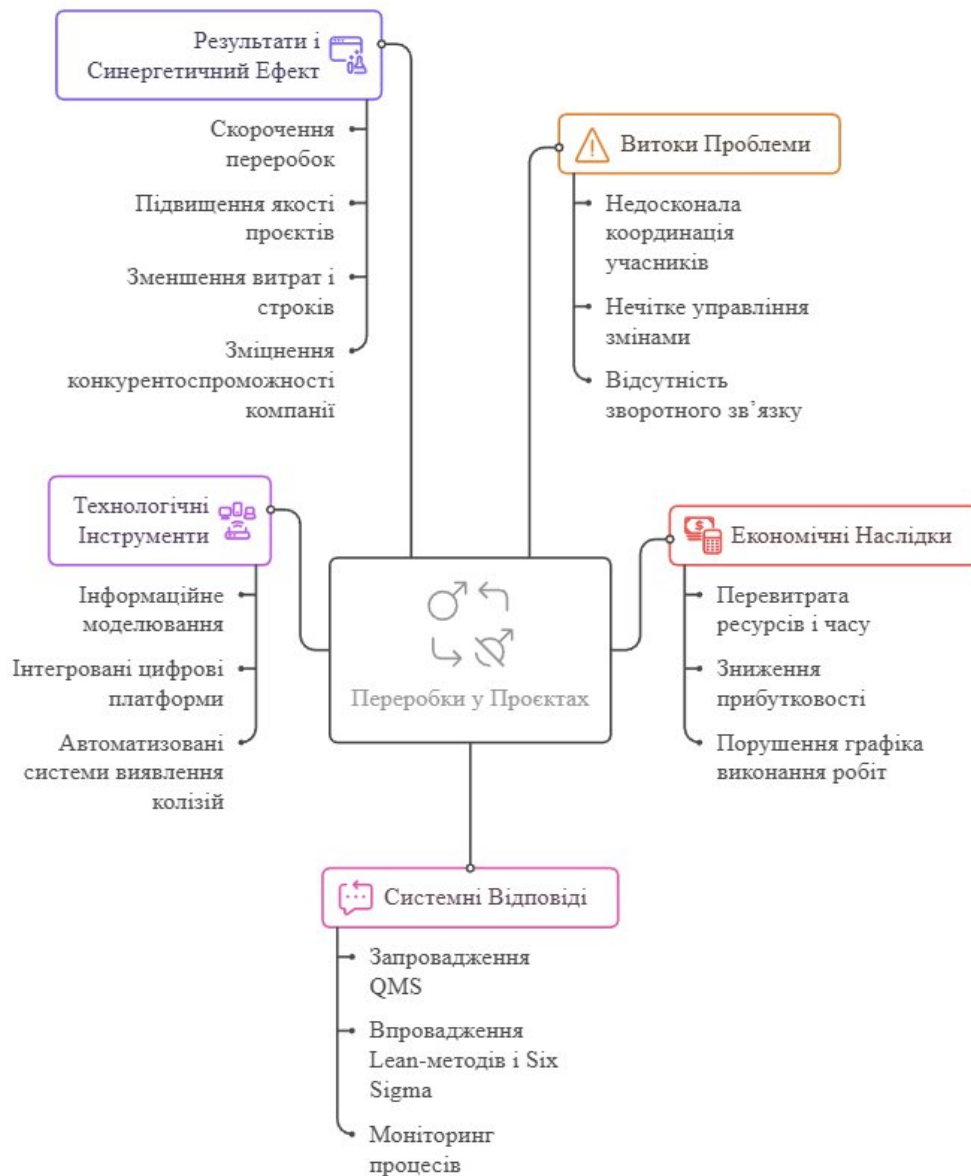


Рис. 4.8. Вплив систем управління якістю та інноваційних технологій на зниження витрат, пов'язаних із переробками
(розроблено автором на основі [136])

Водночас інтегрована когнітивна модель забезпечує умови для самоорганізації та самонавчання системи управління. Вона формує зв'язок між людиною, технологією і процесом, де кожен елемент виконує не лише функціональну, а й пізнавальну роль — виявляє закономірності, прогнозує ризики, визначає потенційні зони конфліктів та оптимізації.

Щоб узагальнити взаємозв'язки між основними складовими інтегрованої системи управління та ефектами, які вона створює, нижче наведемо рисунок 4.9, що демонструє структурну логіку когнітивної взаємодії у проєктному середовищі [307].

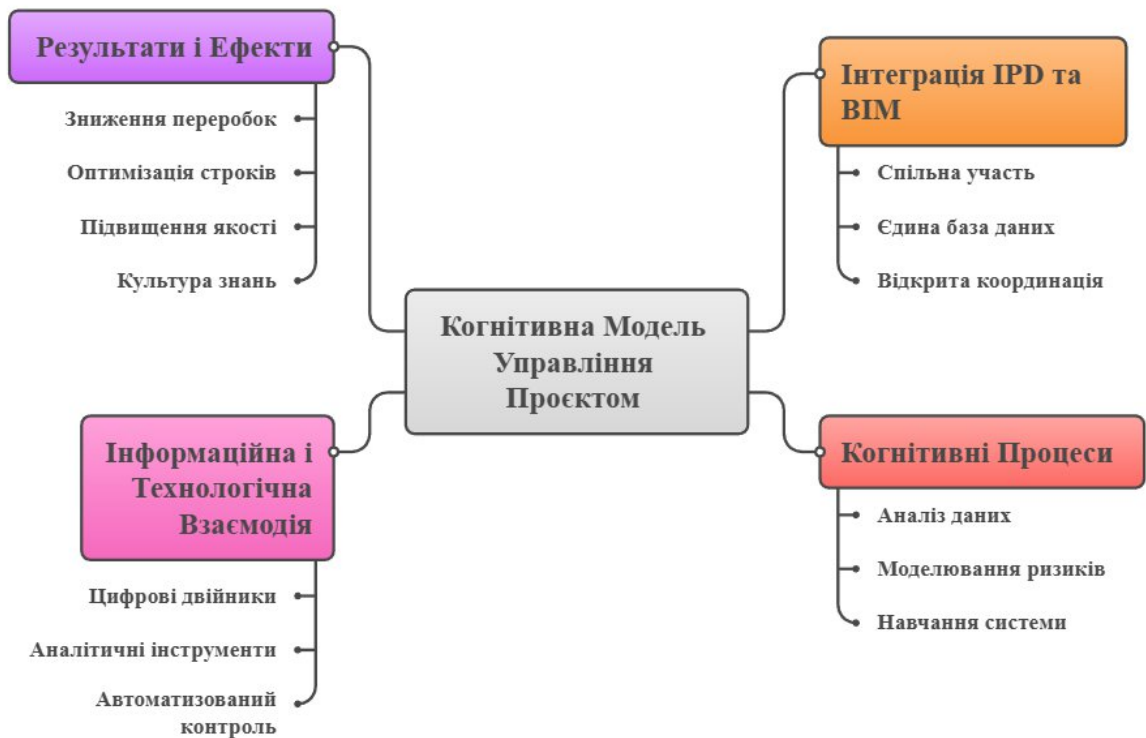


Рис. 4.9. Інтегрована когнітивна модель взаємодії IPD та BIM у системі управління проектом (розроблено автором на основі [307])

Таким чином, когнітивна інтеграція IPD і BIM стає не просто технологічним рішенням, а стратегічним механізмом еволюції будівельного менеджменту. Вона забезпечує перехід від фрагментарного підходу до цілісної системи управління, де інформаційні потоки, аналітичні моделі та людський інтелект об'єднуються в єдиний адаптивний організм. У результаті будівельний проект перетворюється на самонавчальну систему, здатну підвищувати власну ефективність, зменшувати втрати, передбачати ризики та створювати нові стандарти якості у сфері будівництва.

4.4 Моделювання впливу трансакційних витрат і ефектів взаємодії на синергетичну динаміку проекту

Якісне та ефективне управління трансакційними витратами передбачає комплексний, багаторівневий підхід, який охоплює не лише облік і контроль прямих фінансових витрат, але й виявлення прихованих витрат, що виникають у процесі взаємодії між суб'єктами економічної діяльності. Такий підхід базується на глибокому аналізі структурних зв'язків у межах проекту, оцінці інформаційних потоків, рівня координації між сторонами, а також якості інституційних механізмів, що регулюють обмін.

Складність управління трансакційними витратами полягає у неможливості їх прямого вимірювання. На відміну від виробничих витрат, які можна чітко зафіксувати у фінансовій звітності, трансакційні витрати часто мають опосередкований, когнітивний або часовий характер. Вони виявляються через затримки в ухваленні рішень, помилки координації, втрати довіри, інформаційні дисбаланси або юридичні суперечки. Саме тому

у сучасній економіко-управлінській практиці такі витрати розглядаються не лише як фінансова категорія, а як елемент когнітивної та поведінкової динаміки системи управління.

Поняття “трансакційних витрат” було вперше сформульоване ще на початку ХХ століття, коли економічна думка почала розглядати фірму не як абстрактний виробничий механізм, а як інституційну структуру обміну. У центрі цієї концепції — процес взаємодії між економічними агентами, у межах якого відбувається не лише передача товарів чи послуг, але й обмін інформацією, знаннями, гарантіями, зобов’язаннями та ризиками. З цієї точки зору будь-який контракт, угода чи координаційна дія між учасниками проєкту є трансакцією, що супроводжується певними витратами — внутрішніми або зовнішніми [61].

Сучасне розуміння трансакційних витрат передбачає не лише їх економічну, а й соціально-комунікативну складову. Адже ефективність будь-якої трансакції визначається рівнем доступності, достовірності та швидкості обміну інформацією. У цьому контексті особливої ваги набувають витрати на пошук, перевірку, адаптацію та обробку інформації, що потребують не лише ресурсів, але й часу. Високий рівень інформаційної невизначеності безпосередньо впливає на розмір трансакційних витрат і, відповідно, на загальну вартість реалізації проєкту.

Для наочного розуміння взаємозв’язків між основними видами трансакційних витрат, їх джерелами та управлінськими механізмами рисунок 4.10.

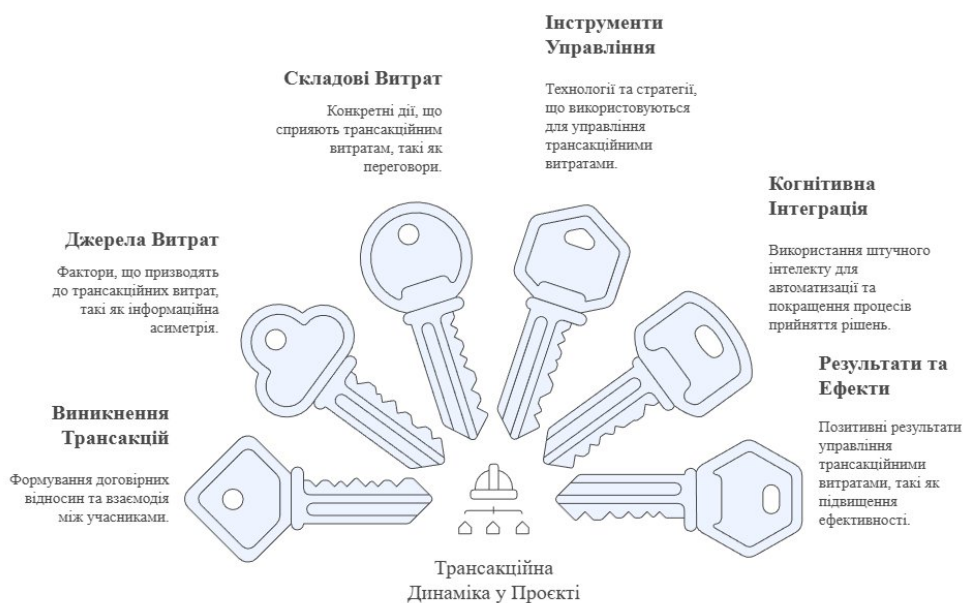


Рис. 4.10. Структура та динаміка управління трансакційними витратами у проєктній діяльності (розроблено автором на основі [61])

Управління трансакційними витратами у сучасній будівельній практиці виступає ключовим чинником економічної стабільності та конкурентоспроможності підприємства. Воно поєднує аналітичні, організаційні та когнітивні інструменти, що дозволяють мінімізувати втрати, пов’язані з недосконалістю ринкової взаємодії.

Інтеграція цифрових рішень, таких як системи управління проєктами на основі BIM або ERP, створює умови для зниження трансакційних бар'єрів за рахунок підвищення прозорості, швидкості прийняття рішень і узгодженості дій. У підсумку ефективне управління цими витратами сприяє формуванню системи адаптивного управління, в якій оптимізуються не лише економічні процеси, а й комунікаційна логіка взаємодії між усіма учасниками будівельного проєкту.

Проблема класифікації трансакційних витрат є однією з центральних у дослідженнях сучасної інституційної економіки та управління проєктами, оскільки від її точності залежить можливість ефективного аналізу, планування й контролю витрат у процесі реалізації проєкту. Науковий дискурс демонструє широкий спектр підходів до структуризації цього поняття — від класичних концепцій економічного обміну до сучасних моделей, що враховують когнітивні, організаційні та цифрові аспекти взаємодії між учасниками.

Загальновідомою є класифікація, яка ґрунтується на уявленні про трансакцію як ланцюг дій, що включає пошук, комунікацію, укладання, контроль і забезпечення виконання угоди. Такий підхід був розроблений у працях Еггертссона і дозволяє відобразити повний цикл трансакційного процесу — від ініціації домовленостей до контролю їхнього виконання та захисту прав власності. Зокрема, виділяють витрати на пошук інформації, необхідної для оцінки умов співпраці; витрати на переговори, які забезпечують узгодження позицій сторін; витрати на укладання контрактів, що фіксують зобов'язання; витрати на моніторинг і витрати на примус до виконання умов, що включають юридичні та адміністративні процедури [85].

У контексті будівельної галузі така класифікація набуває ще більшої ваги, адже кожен етап інвестиційно-будівельного процесу передбачає різні форми комунікації, узгодження інтересів і контроль взаємних зобов'язань. Враховуючи багаторівневу структуру проєктів, трансакційні витрати тут охоплюють інформаційні, контрактні, комунікаційні та управлінські компоненти. Їх характер залежить від складності взаємодії між замовником, проєктантом, підрядником і контролюючими органами.

Згідно з підходом, адаптованим до умов будівельної практики [280], до основних груп трансакційних витрат належать: витрати на збір аналітичної інформації про ринок і технічний стан галузі; контрактинг (переговори, планування, визначення умов співпраці); витрати на координацію дій у процесі спільного використання ресурсів; а також витрати, пов'язані зі захистом прав власності та дотриманням юридичних зобов'язань.

Сучасна практика також передбачає розподіл трансакційних витрат за часовим критерієм — до укладання контракту (*ex ante*) і після його підписання (*ex post*). Такий поділ зумовлений тим, що ризики та типи взаємодії сторін значно змінюються на різних фазах життєвого циклу проєкту. До першої групи відносять витрати на інформаційно-аналітичну підготовку, вибір партнера, розроблення тендерної документації, узгодження технічних умов; до другої — витрати на контроль виконання, аудит, вирішення спорів та корекцію контрактних положень.

Системна класифікація трансакційних витрат у будівництві дає змогу не лише структурувати фінансові потоки, а й визначити ключові точки управлінського впливу, у яких доцільно застосовувати механізми оптимізації. Використання цифрових технологій та інформаційного моделювання проєктів (BIM) відкриває можливість зменшення

трансакційних витрат за рахунок автоматизації процесів координації, прозорості договірних відносин і підвищення швидкості прийняття рішень.

У результаті управління трансакційними витратами стає не лише фінансовим інструментом контролю, а й елементом стратегічного розвитку підприємства, спрямованим на підвищення ефективності взаємодії, стабільності договірної системи та формування довіри між учасниками будівельного проєкту [282].

Для узагальнення та систематизації наведених положень побудований рисунок 4.11, який відображає класифікацію трансакційних витрат за ключовими етапами життєвого циклу будівельного проєкту.



Рис. 4.11. Класифікація трансакційних витрат у будівельній діяльності за етапами життєвого циклу проєкту (розроблено автором на основі [282])

Попри те, що проблематика оцінювання трансакційних витрат у будівельних проєктах має безпосередній вплив на ефективність управління інвестиційним процесом, кількість комплексних досліджень у цьому напрямі залишається обмеженою. Більшість наукових праць лише частково торкаються цього питання, розглядаючи його як складову більш загальних економічних моделей. Проте саме вимірювання трансакційних витрат дозволяє оцінити приховані резерви підвищення ефективності будівництва та виявити внутрішні джерела оптимізації витрат.

Так, у своїй праці Асаул зазначає, що питома вага трансакційних витрат у структурі загальних витрат на реалізацію будівельного проєкту може досягати 25% [255]. Це свідчить про їх суттєвий вплив на економічну результативність будівництва, оскільки

вони охоплюють широкий спектр управлінських, комунікаційних, правових та організаційних витрат, що виникають у ході підготовки та реалізації контрактів.

Одним із наймасштабніших порівняльних аналізів рівня трансакційних витрат стало дослідження, проведене Whittington [155]. У результаті шести тематичних досліджень автор дійшов висновку, що витрати до підписання контракту у традиційній схемі «Проектування — Торги — Будівництво» (DBB) коливаються в межах 0,4–8,8% вартості контракту (в середньому 2,6%), тоді як у системі «Проектування — Будівництво» (DB) — 0–5,7% (у середньому 2,2%).

Водночас трансакційні витрати після укладання контракту виявилися вищими: у DBB — 8,9–14,7% (у середньому 12,6%), а в DB — 3,4–14,3% (у середньому 9,5%). Це пояснюється більшим обсягом комунікацій і координаційних процедур у процесі реалізації проекту, які часто вимагають повторних перевірок, погоджень і змін до контракту.

Дослідження Li і Arditi підтвердило ці тенденції, доповнивши їх результатами електронного анкетування фахівців будівельної галузі. Отримані дані свідчать про те, що середній рівень трансакційних витрат для різних методів реалізації проекту розподіляється таким чином: для DBB — 6,72%, для DB — 7,33%, а для моделі CM at Risk («Будівельне управління з ризиком») — 4,85%.

Порівняльний аналіз показує, що скорочення кількості суб'єктів, залучених до контрактних відносин, а також підвищення інтегрованості управління проектом сприяють зменшенню частки трансакційних витрат. Саме тому перехід до інтегрованих підходів на зразок IPD (Integrated Project Delivery) або гібридних моделей із використанням BIM-технологій дозволяє досягати синергетичного ефекту не лише на стадії проектування, а й у процесі будівництва та експлуатації.

Результати кількох досліджень узагальнено в таблиці 4.6, яка відображає співвідношення трансакційних витрат до загальної вартості проекту залежно від методу реалізації та етапу життєвого циклу.

Подальший розгляд доцільно спрямувати на аналіз витрат експлуатаційного етапу, які також входять до сукупного синергетичного ефекту інтегрованої реалізації проектів.

Управління інфраструктурою сьогодні розглядається як стратегічний компонент системи життєвого циклу будівельного об'єкта, який забезпечує ефективне використання матеріальних, енергетичних та організаційних ресурсів протягом усього періоду експлуатації. Суть цього процесу полягає не лише в контролі за поточними витратами, а й у створенні довгострокових передумов для їх оптимізації в майбутньому. Іншими словами, управління інфраструктурою (Facility Management) — це системна діяльність, спрямована на аналіз, документування, моніторинг та оптимізацію всіх процесів, що впливають на вартість володіння, утримання та використання будівель, споруд та інших об'єктів [6].

Можна зробити висновок, що трансакційні витрати є одним із найвагоміших елементів структури вартості будівельного проекту, а їхній рівень значною мірою залежить від методу реалізації, рівня інтеграції учасників і ступеня цифровізації процесу управління. Зниження таких витрат можливе завдяки оптимізації договірних процедур, уніфікації вимог до документації та широкому впровадженню BIM- і IPD-технологій.

Таблиця 4.6.

Порівняльний аналіз рівня трансакційних витрат у будівельних проєктах за різними методами реалізації *(розроблено автором на основі [6])*

Метод реалізації проєкту	Етап розрахунку витрат	Діапазон трансакційних витрат, % від вартості контракту	Середнє значення, %
«Проектування – Торги – Будівництво» (DBB)	До підписання контракту	0,4 – 8,8	2,6
«Проектування – Будівництво» (DB)	До підписання контракту	0 – 5,7	2,2
«Проектування – Торги – Будівництво» (DBB)	Після підписання контракту	8,9 – 14,7	12,6
«Проектування – Будівництво» (DB)	Після підписання контракту	3,4 – 14,3	9,5
«Проектування – Торги – Будівництво» (DBB)	Сукупно (до + після)	—	6,72
«Проектування – Будівництво» (DB)	Сукупно (до + після)	—	7,33
«Будівельне управління з ризиком» (CM at Risk)	Сукупно (до + після)	—	4,85

Ключовою особливістю такого підходу є орієнтація на інтереси користувача або власника, адже кінцева мета полягає у забезпеченні високої якості експлуатації при мінімальних загальних витратах. Важливою складовою є управління матеріальними ресурсами — земельними ділянками, будівлями, спорудами, інженерною інфраструктурою, машинами, приладами, обладнанням та допоміжними системами [88]. У цьому контексті управління інфраструктурою виступає своєрідним «містком» між технічним обслуговуванням, комерційним управлінням і стратегічним плануванням розвитку об'єкта.

Сучасні концепції Facility Management визначають три головні напрями управління інфраструктурою, кожен з яких виконує специфічну функцію у загальній системі управління нерухомістю. Взаємозв'язок між цими напрямками представлений нижче у вигляді рисунка 4.12.

З практичної точки зору, ефективне управління інфраструктурою дозволяє знизити експлуатаційні витрати на 10–30%, підвищити енергоефективність будівель та продовжити їх життєвий цикл. Особливу роль у цьому відіграє впровадження інтегрованих цифрових платформ управління об'єктами (BIM-FM), що забезпечують актуальність інформації про технічний стан систем, їх обслуговування та витрати у режимі реального часу.

Поєднання технічного, сервісного та економічного управління в єдину когнітивну модель дозволяє створювати адаптивні системи експлуатації, які реагують на зміни навантажень, кліматичних умов і поведінки користувачів. Таким чином, управління

інфраструктурою перетворюється з допоміжної функції на стратегічний інструмент підвищення вартості та конкурентоспроможності об'єкта нерухомості.



Рис. 4.12. Структурна модель управління інфраструктурою будівельного об'єкта (розроблено автором на основі [88])

Сучасна практика управління будівельними проектами свідчить, що саме етап експлуатації є найбільш ресурсоємною фазою життєвого циклу об'єкта. Хоча увага більшості інвесторів традиційно зосереджена на вартості будівництва, численні дослідження показують, що частка витрат, пов'язаних із утриманням, ремонтом, енерговикористанням та модернізацією будівлі, може у кілька разів перевищувати початкові інвестиції у зведення споруди [98].

Іншими словами, реальна економічна ефективність будівництва визначається не стільки вартістю зведення, скільки витратами на експлуатацію протягом усього життєвого циклу, які формують до 70–80% загальних фінансових зобов'язань.

Такий дисбаланс пояснюється тим, що на етапі експлуатації відбувається постійна взаємодія технічних, енергетичних і людських факторів, які потребують регулярного обслуговування. Наприклад, системи опалення, вентиляції, електропостачання, а також управління безпекою вимагають постійного технічного нагляду. Витрати на ці потреби накопичуються поступово, створюючи значну частину фінансового навантаження. У той час як вартість будівельно-монтажних робіт у структурі життєвого циклу об'єкта зазвичай не перевищує 20–30%, витрати на експлуатацію, енергоносії, ремонти та обслуговування можуть сягати 60–75% від загальної вартості володіння.

Однією з основних проблем є відсутність інтегрованих механізмів аналізу цих витрат ще на ранніх стадіях проектування. Часто рішення щодо матеріалів, систем чи

інженерних технологій приймаються без урахування майбутніх витрат на експлуатацію. Застосування інформаційного моделювання будівель (BIM) дозволяє значною мірою змінити цю ситуацію, оскільки моделі «as-built» (побудованих об'єктів) надають можливість прогнозувати і оптимізувати витрати на всіх фазах життєвого циклу — від будівництва до знесення [81].

Для ілюстрації наведемо рисунок 4.13, який вказує на залежність між фазами життєвого циклу об'єкта та структурою його витрат.

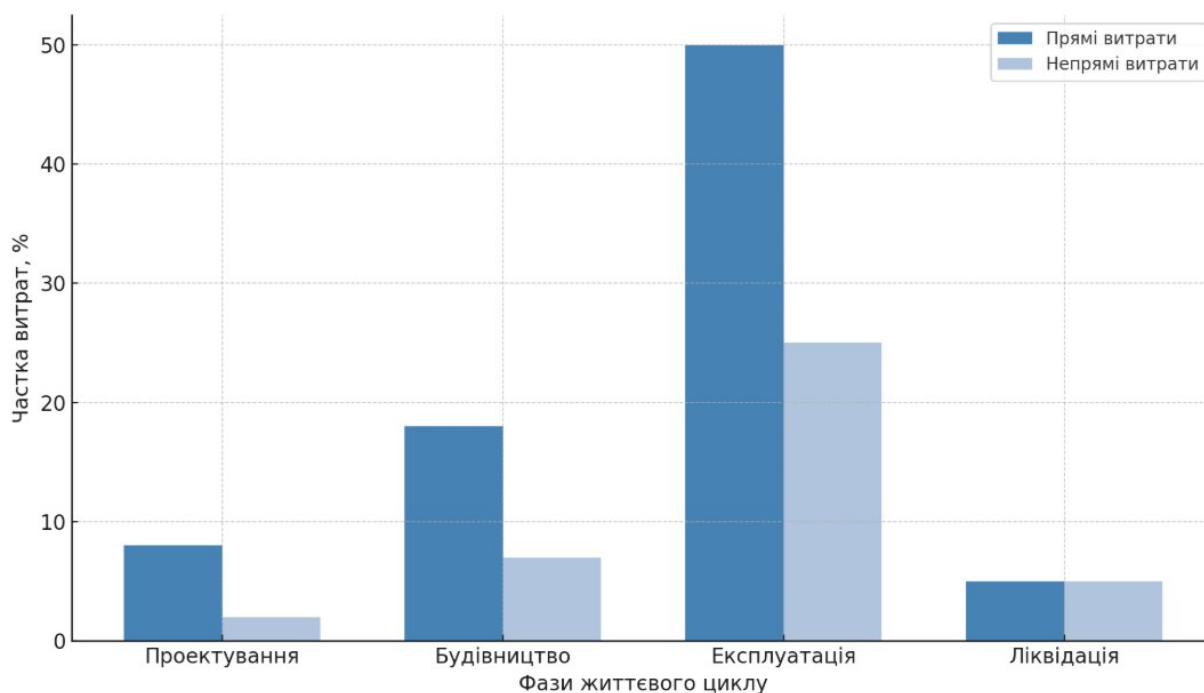


Рис. 4.13. Розподіл сукупних витрат протягом життєвого циклу будівельного об'єкта (розроблено автором на основі [125])

Етап експлуатації є домінуючим за часткою витрат. Саме тут формується основна маса витрат, пов'язаних із технічним обслуговуванням, модернізацією, управлінням енергоефективністю та кадровими ресурсами. Тому сучасна парадигма управління нерухомістю зміщується у бік життєвого циклу (Life Cycle Management), що базується на принципах передбачення та мінімізації витрат ще до початку будівництва.

Оптимізація експлуатаційних витрат можлива лише за умови впровадження цифрових систем моніторингу, аналітики великих даних (Big Data) та когнітивних моделей прогнозування технічного стану об'єктів, які дозволяють переходити від реактивного до проактивного управління. Таким чином, забезпечується не лише економічна ефективність, але й сталий розвиток у сфері будівництва, коли будівля стає самодостатньою системою, здатною адаптуватися до змін середовища.

Сучасна модель управління будівельними проектами ґрунтується на розумінні того, що ефективність усього життєвого циклу об'єкта формується через інтеграцію інтелектуальних, організаційних і технологічних механізмів. Основна ідея полягає у створенні когнітивної системи управління, здатної поєднувати аналітичні, інформаційні та поведінкові аспекти діяльності проєктних команд. Інтеграція методів IPD (Integrated

Project Delivery) та BIM дозволяє сформувати єдину середу даних, де інформація використовується як актив, а рішення приймаються на основі цифрового моделювання, сценарного прогнозування та зворотного зв'язку.

У межах реалізації такої моделі ключовими ефектами є зменшення кількості колізій та помилок, скорочення часу реалізації проєктів, зниження транзакційних витрат і оптимізація експлуатаційних витрат. Саме ці чинники формують синергетичний ефект інтегрованої реалізації, коли цифрові інструменти не лише автоматизують робочі процеси, а створюють нову логіку взаємодії між учасниками.

Важливим напрямом стає управління транзакційними витратами, яке розглядається як аналітична система ідентифікації, вимірювання та мінімізації втрат, що виникають у процесі комунікацій, укладення контрактів, контролю та забезпечення прав власності. Таке управління формує основу для підвищення прозорості, відповідальності та ефективності всього інвестиційно-будівельного комплексу.

Оцінювання сукупних витрат життєвого циклу будівельного об'єкта є ключовим елементом сучасного управління у сфері будівництва. Воно базується на системному підході, який дозволяє враховувати не лише прямі фінансові витрати, але й усі непрямі, що виникають протягом усього періоду існування об'єкта — від його проєктування до ліквідації або реновації. У межах когнітивної моделі управління цей процес набуває інтегрованого характеру, оскільки оцінка витрат розглядається не як статичний економічний розрахунок, а як багатовимірна система взаємодії технічних, організаційних та інформаційних чинників, які формують поведінку всієї будівельної системи.

Когнітивна природа такої моделі полягає в тому, що кожне управлінське рішення впливає на економічні параметри системи через механізми зворотного зв'язку. Зміни в інформаційних потоках, рівень координації між учасниками проєкту, ступінь цифрової інтеграції або якість прийняття рішень безпосередньо трансформуються у зміни витрат. Відтак, витрати набувають ознак інформаційних сигналів, що відображають стан системи в цілому.

Життєвий цикл будівельного об'єкта охоплює послідовність взаємопов'язаних етапів, які формують логіку економічного розвитку проєкту. Початкова стадія — ініціація та проєктування — визначає концептуальні рамки, де формуються базові показники вартості, виконується документація, здійснюється експертиза та узгодження. Наступна фаза — будівництво — включає в себе процеси матеріального забезпечення, виконання будівельно-монтажних робіт, контроль якості та організацію взаємодії між підрядниками. Найдовшою і найбільш витратною частиною є експлуатація, яка охоплює енерговитрати, ремонт, технічне обслуговування, оновлення інженерних систем та управління персоналом. Завершальна стадія — ліквідація або реновація — передбачає демонтаж, переробку або відновлення будівлі з частковим збереженням її функцій [124].

Кожен із цих етапів генерує певний набір витрат, які взаємопов'язані між собою не лише у фінансовому, але й у когнітивному вимірі. У межах системного підходу витрати сприймаються як динамічна характеристика, що змінюється залежно від рішень, прийнятих у попередніх фазах. Наприклад, підвищення точності проєктування завдяки використанню BIM-моделей здатне зменшити ризик колізій на стадії будівництва та, відповідно, скоротити майбутні витрати на експлуатацію. Така взаємозалежність формує ефект накопичення управлінських рішень у часі, який можна описати як когнітивний

континуум вартості. Узагальнена структура витрат життєвого циклу представлена у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7.

Орієнтовна структура сукупних витрат життєвого циклу будівельного об'єкта
(розроблено автором на основі [124])

Етап життєвого циклу	Основні складові витрат	Частка у загальній вартості, %
Проектування та узгодження	Концепція, документація, експертизи	8–12
Будівництво	Матеріали, праця, контроль якості	15–25
Експлуатація	Енергія, ремонт, техобслуговування, персонал	55–65
Ліквідація / Реновація	Демонтаж, переробка, утилізація	5–10

Домінуючою складовою сукупних витрат є фаза експлуатації, на яку припадає понад половина всіх фінансових ресурсів, що витрачаються протягом життєвого циклу об'єкта. Цей факт підкреслює, що ефективне управління на етапі експлуатації має не менше значення, ніж якісне проектування чи будівництво. Власне, саме на цій фазі найбільш очевидно проявляється синергетичний ефект від використання когнітивно-аналітичних інструментів управління, зокрема цифрових моделей життєвого циклу (BIM, LCA, CDE) [266].

Графічно взаємозалежність між етапами життєвого циклу та накопиченням витрат можна представити у вигляді рисунка 4.14, що відображає зростання фінансових зобов'язань у часі.

Когнітивна аналітика дозволяє не лише фіксувати факт зростання витрат, а й розпізнавати приховані закономірності їх виникнення. Наприклад, збільшення експлуатаційних витрат може бути наслідком не лише технічного зносу, а й організаційної неузгодженості або інформаційних втрат між ланками системи управління. У такому контексті витрати стають своєрідними маркерами ефективності управління, відображаючи баланс між економічними рішеннями, якістю комунікацій і ступенем цифрової зрілості проекту.

Побудова аналітичних моделей, що враховують взаємозв'язок між витратами та поведінковими параметрами системи, створює основу для формування когнітивної архітектури управління. У цій архітектурі інформаційні потоки, управлінські рішення та фінансові показники з'єднуються у єдину систему, де дані не лише фіксують стан проекту, а й впливають на нього, формуючи цикли самонавчання та оптимізації [266].

Більшість витрат зосереджено на етапі експлуатації, тоді як початкові інвестиції становлять відносно невелику частку. Ця закономірність пояснює, чому цифрові технології управління життєвим циклом об'єкта набувають вирішального значення: вони дозволяють передбачати сценарії майбутніх витрат і оптимізувати структуру рішень на ранніх стадіях.

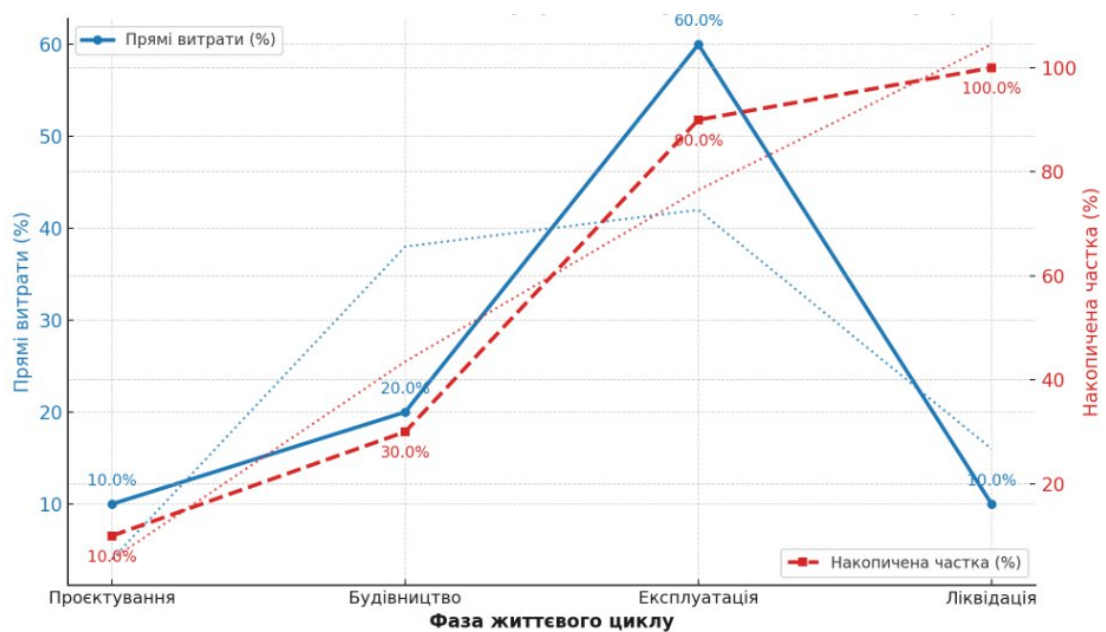


Рис. 4.14. Динаміка зміни сукупних витрат у межах життєвого циклу будівлі
(розроблено автором на основі [266])

Когнітивно-аналітична модель оцінки витрат перетворює процес управління з реактивного на проактивний. Вона створює можливість не лише вимірювати економічні показники, а й прогнозувати їх, формуючи систему, здатну до адаптації, навчання і самовдосконалення.

Сучасна концепція управління життєвим циклом будівельного об'єкта дедалі більше орієнтується на фазу експлуатації, яка формує основну частину його сукупних витрат. Саме на цьому етапі визначається реальна ефективність прийнятих на початкових фазах рішень, адже будь-які помилки або неузгодженості в проектуванні чи будівництві неминуче проявляються у процесі використання споруди. Когнітивна система управління розглядає експлуатаційні витрати не як звичайну статтю фінансових видатків, а як індикатор загальної стійкості та збалансованості системи.

Експлуатаційна фаза життєвого циклу відображає рівень зрілості проекту — наскільки ефективно організовано обслуговування будівлі, чи достатньо інтегровані інформаційні потоки, чи забезпечено належну взаємодію між користувачем, експлуатуючими організаціями та власником. В умовах переходу до цифрових технологій будівництва саме цей етап вимагає найбільшої уваги, оскільки він має найтриваліший часовий горизонт і найвищий потенціал для оптимізації через впровадження інтелектуальних систем управління.

У межах когнітивного підходу експлуатаційні витрати розглядаються як результат взаємодії чотирьох ключових факторів: технічного, організаційного, інформаційного та людського. Технічний аспект охоплює стан будівельних конструкцій і інженерних систем, їхню довговічність і потребу в технічному обслуговуванні. Організаційний фактор визначає рівень координації процесів, своєчасність реагування на технічні несправності, ефективність управління персоналом і ресурсами. Інформаційний аспект пов'язаний із якістю даних, які надходять від сенсорних систем і цифрових платформ управління.

Нарешті, людський чинник виражається у професійній компетенції операторів, техніків, керівників і користувачів будівлі [251].

Зміна співвідношення між цими елементами безпосередньо впливає на структуру витрат. Наприклад, недостатня автоматизація моніторингу може призвести до надмірних витрат на технічне обслуговування, тоді як надлишкова кількість ручних процесів — до помилок і втрати часу. Когнітивна система управління здатна ідентифікувати такі дисбаланси завдяки аналізу поведінкових моделей системи, перетворюючи інформаційні сигнали на управлінські дії.

Для аналітичного опису структури експлуатаційних витрат можна виокремити кілька груп, що утворюють ядро фінансової моделі управління об'єктом. Ці групи наведено у таблиці 4.8.

Таблиця 4.8.

Структура експлуатаційних витрат у когнітивній системі управління
(розроблено автором на основі [251])

Категорія витрат	Зміст складових	Частка у загальній структурі, %
Енергетичні витрати	Споживання електроенергії, тепла, води, газу, витрати на системи вентиляції та кондиціонування	35–40
Технічне обслуговування	Планові та аварійні ремонти, діагностика, заміна елементів обладнання, інженерних систем	25–30
Управління будівлею	Заробітна плата персоналу, витрати на адміністрування, моніторинг, страхування	15–20
Комунікаційні та ІТ-витрати	Робота цифрових систем, баз даних, сенсорних мереж, обслуговування програмного забезпечення	10–15
Екологічне утримання	Утилізація відходів, екологічний аудит, зниження вуглецевого сліду	5–10

Найбільш вагомими статтями є енергетичні витрати та технічне обслуговування. Проте саме ці категорії мають найвищий потенціал до зниження через впровадження інтелектуальних технологій моніторингу. Зокрема, використання сенсорних систем у поєднанні з аналітичними платформами BIM дозволяє у реальному часі відстежувати параметри енергоспоживання, ідентифікувати втрати тепла, контролювати режими роботи обладнання та прогнозувати відмови систем.

Когнітивна модель управління створює можливість формування циклу безперервного навчання: система фіксує дані про експлуатацію, аналізує відхилення, формує прогноз і автоматично коригує параметри функціонування об'єкта. У такий спосіб управління набуває адаптивного характеру, коли рішення приймаються не постфактум, а наперед, на основі предиктивної аналітики.

Важливо підкреслити, що ефективність когнітивного управління витратами значною мірою залежить від рівня інтеграції між усіма учасниками життєвого циклу — проєктувальниками, експлуатуючими організаціями, інвесторами та користувачами. Коли

інформаційна система об'єднує всі ці елементи в єдиний цифровий простір, виникає можливість створення комплексного «дзеркала» життєвого циклу будівлі, у якому кожен елемент впливає на інший. У цьому сенсі когнітивна система не лише керує витратами, а й формує інтелектуальний потенціал будівлі як самонавчальної системи [239].

Динаміку зміни експлуатаційних витрат у часі можна представити у вигляді рисунка 4.15, який відображає взаємозалежність між ступенем цифрової інтеграції та зниженням витрат протягом експлуатаційного періоду.

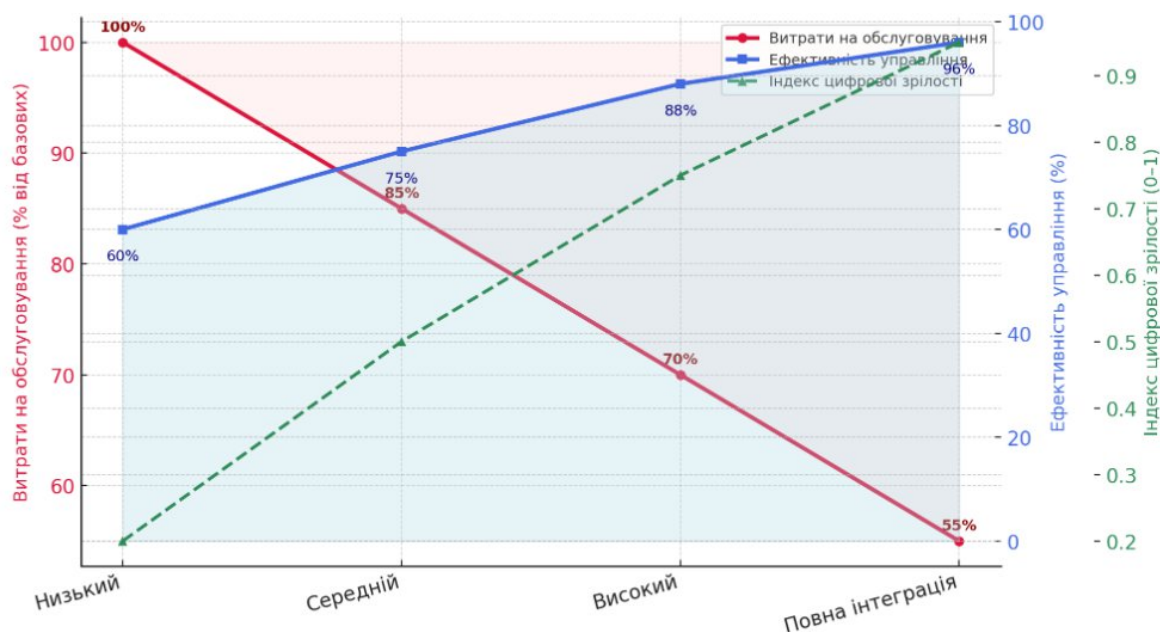


Рис. 4.15. Вплив рівня цифрової інтеграції на зміну експлуатаційних витрат (розроблено автором на основі [239])

Зростання рівня цифрової інтеграції систем управління безпосередньо корелює зі зниженням експлуатаційних витрат. Це пояснюється тим, що цифрові платформи забезпечують прозорість даних, зменшують кількість ручних операцій, прискорюють ухвалення рішень і дають можливість запобігати проблемам до їх виникнення. Таким чином, будівельний об'єкт поступово перетворюється на кіберфізичну систему, де інформація, ресурси і процеси утворюють єдиний когнітивний простір.

Когнітивна система управління експлуатаційними витратами є фінальним етапом розвитку цифрової парадигми в будівництві. Вона забезпечує перехід від реактивного управління до превентивного, від фіксації подій до їх прогнозування, від витратної логіки до логіки економії ресурсів і підвищення стійкості [260]. У цьому контексті управління витратами набуває нового змісту — стає не лише економічним інструментом, а й проявом еволюції інтелектуальної взаємодії між людиною, технологією та простором.

РОЗДІЛ 5. ІНФОРМАЦІЙНО-КОГНІТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ

5.1. Розроблення моделі вибору оптимальної організаційно-мережевої структури когнітивного типу

Процес прийняття управлінських рішень у сучасному будівельному інвестиційному проєкті набуває характеру багатовимірної, динамічної та когнітивно насиченої системи, у якій взаємодіють численні суб'єкти — інвестори, замовники, проєктні організації, підрядники, консультанти, постачальники, цифрові платформи й аналітичні системи. Кожен із елементів формує власні інформаційні потоки, що циркулюють у межах мережі та постійно впливають на швидкість і точність ухвалення управлінських рішень. У результаті зростає обсяг даних, інтенсивність комунікацій, частота змін у проєктному середовищі, що вимагає координації дій, безперервного аналізу та прогнозування наслідків кожного управлінського кроку [302].

Звичайні ієрархічні або жорстко централізовані моделі прийняття рішень, котрі застосовувалися в попередні десятиліття, уже не відповідають реаліям сучасного будівництва, вони не здатні враховувати зростаючу складність міжорганізаційних зв'язків, асиметрію інформації та часову нестабільність умов реалізації проєкту. В умовах цифрової трансформації та інтеграції систем BIM, ERP, LSTM-прогнозування і ризик-менеджменту управління проєктом потребує нової архітектури, що поєднує логіку мережевої взаємодії з елементами когнітивного мислення — навчання, узагальнення досвіду, самокорекції та адаптації.

Когнітивні механізми у структурі управління виконують функції інтелектуального узгодження дій між учасниками мережі, забезпечують цілісність комунікаційного простору, оптимізують потоки інформації та підвищують рівень ситуаційної обізнаності всіх сторін. Вони дають змогу системі реагувати на зміни середовища, передбачати їх, використовуючи накопичений досвід і математично-аналітичні моделі для прогнозування сценаріїв розвитку подій [318].

Процес ухвалення рішень у сучасному будівельному інвестиційному проєкті розглядається не як статичний акт вибору, а як безперервний когнітивно-комунікаційний процес, у якому аналітика, інформаційний обмін і зворотний зв'язок утворюють єдину інтегровану систему (рис. 5.1). Впровадження когнітивного рівня управління створює можливість для побудови адаптивної організаційно-мережевої структури, здатної до самонавчання, прогнозування ефектів прийнятих рішень та підтримання оптимальної ефективності проєктного середовища навіть за умов високої невизначеності.

Оптимальність ухвалення управлінських рішень у когнітивно-орієнтованій мережевій системі визначається швидкістю обміну інформацією чи надійністю комунікаційних каналів, рівнем когнітивної узгодженості між учасниками проєкту. Показник відображає, наскільки ефективно суб'єкти колективної взаємодії сприймають, інтерпретують і узгоджують інформацію у процесі прийняття рішень. В умовах сучасного будівельного інвестиційного середовища, де залучено десятки організаційних рівнів та сотні інформаційних зв'язків, когнітивна узгодженість виступає критичним чинником стабільності системи.



Рис. 5.1. Схема процесу прийняття рішень у когнітивній організаційно-мережевій структурі (розроблено автором на основі [318])

Для формалізації процесу введемо узагальнену формулу ефективності управлінської взаємодії:

$$F = k_i \times k_c \times F_0, \quad (5.1)$$

де: F — інтегральний показник ефективності процесу прийняття рішень; F_0 — базовий потенціал ефективності мережевої структури, що відображає її технічні, організаційні та інформаційні можливості; k_i — структурний коефіцієнт, який характеризує тип організаційно-мережевої структури (фокальна, динамічна, мультифокальна тощо); k_c — когнітивний коефіцієнт узгодженості, що показує рівень синхронізації та спільного розуміння між учасниками мережі.

Для конкретизації розглянемо умовний приклад розрахунку. Нехай: базова ефективність структури $F_0 = 0.8$ (що відповідає 80 % потенційної продуктивності системи); структура має фокальний тип, отже $k_i = 0.5$; рівень когнітивної узгодженості між учасниками оцінено на $k_c = 0.9$.

Підставимо ці значення у формулу:

$$F = 0.5 \times 0.9 \times 0.8 = 0.36.$$

Інтегральна ефективність ухвалення управлінських рішень у даній фокальній структурі становить $F = 0.36$, тобто лише 36 % від максимально можливої. Якщо ж для цієї самої системи впровадити когнітивний модуль аналізу взаємодій і підвищити рівень узгодженості до $k_c = 0.95$, а також перейти на мультифокальний тип структури з коефіцієнтом $k_i = 0.9$, отримаємо: $F = 0.9 \times 0.95 \times 0.8 = 0.684$.

Завдяки когнітивній оптимізації ефективність системи підвищується з 36 % до 68,4 %, тобто більш ніж на 90 % відносного приросту. Свідчить, що когнітивна узгодженість є ключовим параметром підвищення результативності мережевого управління і повинна враховуватися при проектуванні організаційних моделей сучасних будівельних систем.

Фокальний когнітивний тип організаційно-мережевої структури являє собою модель із чітко вираженим центром управління, котрий виступає основним фокусом концентрації інформаційних потоків, аналітичних процесів і прийняття рішень. У системі всі інформаційні взаємодії мають напрямок до або від центрального вузла, що забезпечує швидкість координації, але водночас створює ризики перевантаження комунікаційного ядра. Фокальний центр виконує адміністративну та когнітивно-аналітичну функцію: він узагальнює інформацію від периферійних учасників, аналізує рівень відповідності отриманих даних цільовим параметрам проекту та формує коригувальні впливи у вигляді управлінських рішень.

У межах будівельного інвестиційного проекту така модель найчастіше відповідає ситуації, коли генеральний підрядник або керуюча компанія здійснює централізований контроль за всіма підрядними структурами. Фокус акумулює інформацію з різних джерел — планово-економічних відділів, технічного нагляду, постачання, фінансових підрозділів — і забезпечує когнітивну обробку даних для вибору оптимального управлінського рішення. Центральний вузол у системі можна порівняти з нейронним центром, котрий інтегрує потоки сигналів, фільтрує шум, здійснює навчання на основі накопиченого досвіду і поширює оновлені моделі поведінки на периферійні елементи мережі.

Важливою властивістю фокального когнітивного типу є його здатність підтримувати стабільність системи при відносно низькій складності інформаційних зв'язків. Кожен периферійний елемент має єдиний канал комунікації з центром, кількість зв'язків визначається лінійною залежністю від кількості учасників, що спрощує контроль і зменшує ризик втрати узгодженості. Разом із тим централізація створює обмеження: при зростанні кількості учасників система починає втрачати гнучкість, а когнітивне навантаження на центральний вузол різко зростає. Проявляється у збільшенні часу реакції на зміни, затримках у прийнятті рішень та зниженні адаптивності [379].

Когнітивна сутність фокального типу полягає в тому, що центральний елемент виконує роль “когнітивного ядра” — він приймає рішення, здійснює оцінку власної діяльності, тобто має механізм внутрішнього навчання. На практиці може реалізовуватися через використання аналітичних модулів або штучного інтелекту, котрий формує зворотний зв'язок між управлінськими діями та їх фактичними наслідками. У такий спосіб

система поступово самонавчається, оптимізуючи структуру комунікацій і покращуючи ефективність обміну інформацією.

З математичного погляду фокальний когнітивний тип можна охарактеризувати коефіцієнтом структурної централізації, котрий відображає частку реалізованих каналів комунікації відносно максимально можливої кількості. Його базове визначення має вигляд:

$$k_1 = \frac{l}{n}, \quad (5.2)$$

де: l — кількість активних комунікаційних зв'язків між центром і периферійними учасниками, n — загальна кількість елементів мережі.

Відповідно, загальна ефективність фокального когнітивного типу визначається добутком трьох параметрів — структурного коефіцієнта k_1 , когнітивного коефіцієнта узгодженості k_c і базового потенціалу ефективності F_0 :

$$F_1 = k_1 \times k_c \times w_i \times F_0, \quad (5.3)$$

де: w_i — ваговий коефіцієнт значущості кожного учасника у структурі. Формула дозволяє оцінити реальний рівень ефективності комунікаційної взаємодії у межах фокальної моделі. Якщо, наприклад, у системі з десятьма підрозділами активними залишаються п'ять каналів ($k_1 = 0,5$), рівень когнітивної узгодженості між учасниками досягає $k_c = 0,9$, базовий потенціал структури $F_0 = 0,8$, а значущість підрозділу $w_i = 1$, тоді інтегральна ефективність становитиме: $F_1 = 0,5 \times 0,9 \times 1 \times 0,8 = 0,36$.

Фактична ефективність фокальної когнітивної системи складає близько 36 % від потенційно можливої, що відображає обмеження централізованого управління в умовах зростаючої складності середовища. Для підвищення цього показника необхідно розширити когнітивний контур — включити механізми децентралізованого аналізу, інтелектуальної фільтрації даних і часткового самоуправління периферійних вузлів. Зміни дають змогу перетворити традиційну фокальну модель на адаптивно-когнітивну, у якій центр зберігає роль координатора, але делегує частину аналітичних і прогностичних функцій інтелектуальним агентам нижчого рівня.

Структурна візуалізація фокального когнітивного типу подана на рисунку 2. Вона демонструє принцип організації інформаційних потоків у межах централізованої мережевої системи, у якій усі периферійні елементи підключені до єдиного когнітивного центру. Центр виконує функції інтеграції, аналізу, узгодження та прийняття рішень, тоді як периферійні вузли відповідають за збирання, первинну обробку і передачу даних. На рисунку 5.2 чітко відображено, що інформаційні зв'язки мають радіальний характер, спрямований до та від центрального ядра, котре виступає «інтелектуальним вузлом» системи. Топологія забезпечує високу керованість і стабільність комунікацій, але водночас обмежує гнучкість, периферійні елементи не мають прямих горизонтальних каналів між собою [308]. Фокальний тип є базовим рівнем когнітивного моделювання

організаційно-мережевих структур, на основі якого надалі формуються динамічні та мультифокальні варіанти.

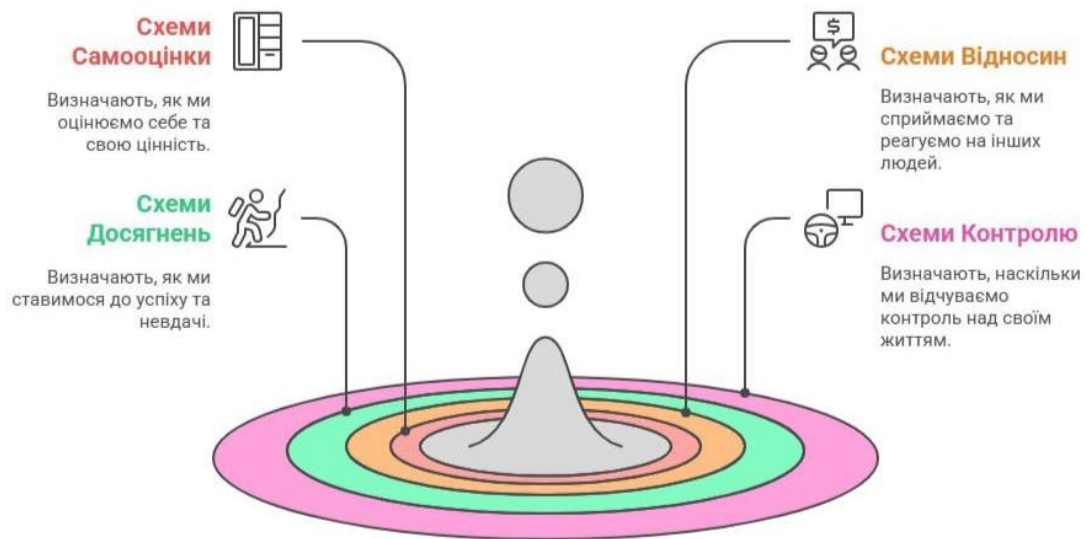


Рис. 5.2. Схема фокального когнітивного типу МОС
(розроблено автором на основі [308])

Динамічний когнітивний тип організаційно-мережевої структури характеризується децентралізованою формою управління, у якій кожен учасник системи виступає виконавцем, активним генератором та інтерпретатором управлінської інформації. На відміну від фокальної моделі, де всі комунікації проходять через один центр, динамічна структура ґрунтується на принципі горизонтальної взаємодії, що забезпечує вищий рівень узгодженості та швидше реагування на зміни середовища. Кожен вузол у мережі має прямі зв'язки з іншими, формуючи багатовекторну систему обміну даними, де інформаційні потоки рухаються у кількох напрямках одночасно. Завдяки цьому виникає ефект когнітивної синергії, коли спільне знання перевищує суму індивідуальних знань окремих учасників [332].

Динамічний когнітивний тип найдоцільніший для складних будівельних проєктів, що потребують постійного узгодження між великою кількістю підрядних організацій, постачальників, проєктних груп і технічного нагляду. Система функціонує на основі принципу зворотного когнітивного зв'язку: інформація, отримана від одного учасника, миттєво стає доступною для всіх інших, що створює ефект колективного навчання. Зміна параметрів середовища або виникнення нових умов автоматично ініціює адаптивну реакцію системи без необхідності централізованого втручання. А ідхід суттєво підвищує швидкість ухвалення рішень і зменшує ризики, пов'язані з перевантаженням інформаційних каналів.

Когнітивна природа динамічної структури полягає у взаємному навчанні між її елементами. Кожен вузол постійно аналізує інформацію, отриману від інших, формує власну інтерпретацію та передає скориговані дані назад у мережу. Створює механізм розподіленого інтелекту, у межах якого відбувається обмін даними, поступове накопичення знань, що підвищує загальну компетентність системи. Інформаційні потоки у такій мережі не мають фіксованої траєкторії — вони перебудовуються залежно від

контексту, ваги завдань і доступності ресурсів. Завдяки цьому система зберігає стабільність за умов різких змін зовнішнього середовища.

Математично ефективність динамічного когнітивного типу можна описати через вираз:

$$F_2 = k_2 \times k_c^2 \times k_a \times F_0, \quad (5.4)$$

де: k_2 — коефіцієнт структурної насиченості зв'язків, який враховує кількість і якість комунікацій між елементами; k_c — когнітивний коефіцієнт узгодженості, що відображає рівень спільного розуміння між учасниками; k_a — коефіцієнт адаптивності системи до змін середовища; F_0 — базова ефективність структури. Збільшення кількості зв'язків між учасниками підвищує когнітивну синергію, однак надмірна щільність комунікацій призводить до перевантаження мережі, тому оптимальне значення k_2 визначається рівнянням:

$$k_2 = 1 - \frac{n-2}{n_{max}}, \quad (5.5)$$

де: n — кількість активних учасників мережі, n_{max} — граничне значення, після якого починається зниження ефективності через інформаційне перевантаження.

На рисунку 5.3 подано узагальнену схему динамічного когнітивного типу, котра відображає розподіл інформаційних потоків і зворотних зв'язків між елементами системи [324].



Рис. 5.3. Схема динамічного когнітивного типу МОС
(розроблено автором на основі [324])

Мультифокальний когнітивний тип організаційно-мережевої структури є розвиненою формою динамічної моделі, у якій система управління представлена не одним, а кількома когнітивними центрами, кожен із яких виконує функції локального аналізу, ухвалення рішень та формування зворотного зв'язку в межах певного підпростору мережі. На відміну від фокальної моделі, де домінує один центр, і від динамічної — де всі учасники взаємодіють на рівних, мультифокальна структура поєднує їхні переваги: забезпечує гнучкість горизонтальних комунікацій та стабільність керованості через наявність кількох ієрархічно пов'язаних когнітивних вузлів. У такій системі формується природна сегментація за напрямками діяльності — проєктний менеджмент, фінанси, технічний контроль, постачання, ризик-менеджмент тощо, кожен із яких має власний “фокус знань”.

Основна перевага мультифокальної когнітивної структури полягає у високій здатності до масштабування та адаптації. Коли відбувається зміна зовнішніх умов або виникає необхідність у перерозподілі ресурсів, система не потребує централізованого перезапуску — локальні центри самостійно переорієнтовують взаємодію, узгоджуючи дії через когнітивні інтерфейси міжфокусного рівня. Забезпечує стійкість до перевантажень, знижує ризик інформаційних затримок і підвищує загальну швидкість реагування. Механізм колективного навчання реалізується через взаємне обмінювання моделей, коли результати аналітики одного фокусу стають доступними для інших, утворюючи ефект когнітивного резонансу — ситуацію, за якої локальні знання узгоджуються в єдину інтелектуальну систему управління [334].

У будівельному інвестиційному проєкті мультифокальна структура найбільш ефективна при комплексній взаємодії між головним офісом, підрядними компаніями, субпідрядниками, технічними консультантами та цифровими платформами аналітики. Кожен з таких вузлів здатен самостійно аналізувати ситуацію, формувати управлінські висновки та передавати їх іншим центрам для когнітивного узгодження. Створює інтелектуально розподілену мережу, у якій рішення формуються колективно, але без втрати локальної відповідальності.

Формалізувати ефективність мультифокальної когнітивної структури можна через рівняння:

$$F_3 = k_3 \times (k_c \times k_a)^{\frac{1}{2}} \times \sum_{i=1}^m w_i F_{0i}, \quad (5.6)$$

де: k_3 — коефіцієнт структурної когерентності, який відображає узгодженість між фокусами; k_c — середній рівень когнітивної узгодженості; k_a — коефіцієнт адаптивності системи; w_i — ваговий коефіцієнт важливості i -тої підсистеми; F_{0i} — базова ефективність кожного фокусу; m — кількість фокусів у мережі.

Для ілюстрації розглянемо умовний приклад, у якому система має три когнітивні фокуси (технічний, фінансовий і ризиковий). Нехай $F_{01} = 0,8$, $F_{02} = 0,85$, $F_{03} = 0,75$ вагові коефіцієнти рівні $w_1 = 0,4$, $w_2 = 0,35$, $w_3 = 0,25$, середній рівень когнітивної узгодженості $k_c = 0,9$, адаптивність $k_a = 0,85$, а структурна когерентність $k_3 = 0,95$. Тоді:

$$F_3 = 0,95 \times (0,9 \times 0,85)^{1/2} \times (0,4 \times 0,8 + 0,35 \times 0,85 + 0,25 \times 0,75).$$

$$F_3 = 0,95 \times (0,874)^{1/2} \times (0,32 + 0,2975 + 0,1875) = 0,95 \times 0,935 \times 0,805 = 0,714.$$

Інтегральна ефективність мультифокальної когнітивної структури становить близько 71,4 %, що майже вдвічі перевищує показники фокальної системи й суттєво перевершує динамічний тип. Пояснюється тим, що мультифокальна модель одночасно використовує локальні переваги автономних аналітичних центрів і глобальний когнітивний механізм узгодження, який підтримує баланс між централізацією та самостійністю [293].

На рисунку 4 зображено узагальнену схему мультифокального когнітивного типу, котра ілюструє взаємозв'язки між окремими когнітивними фокусами, напрямки інформаційних потоків і зворотні канали узгодження між ними.

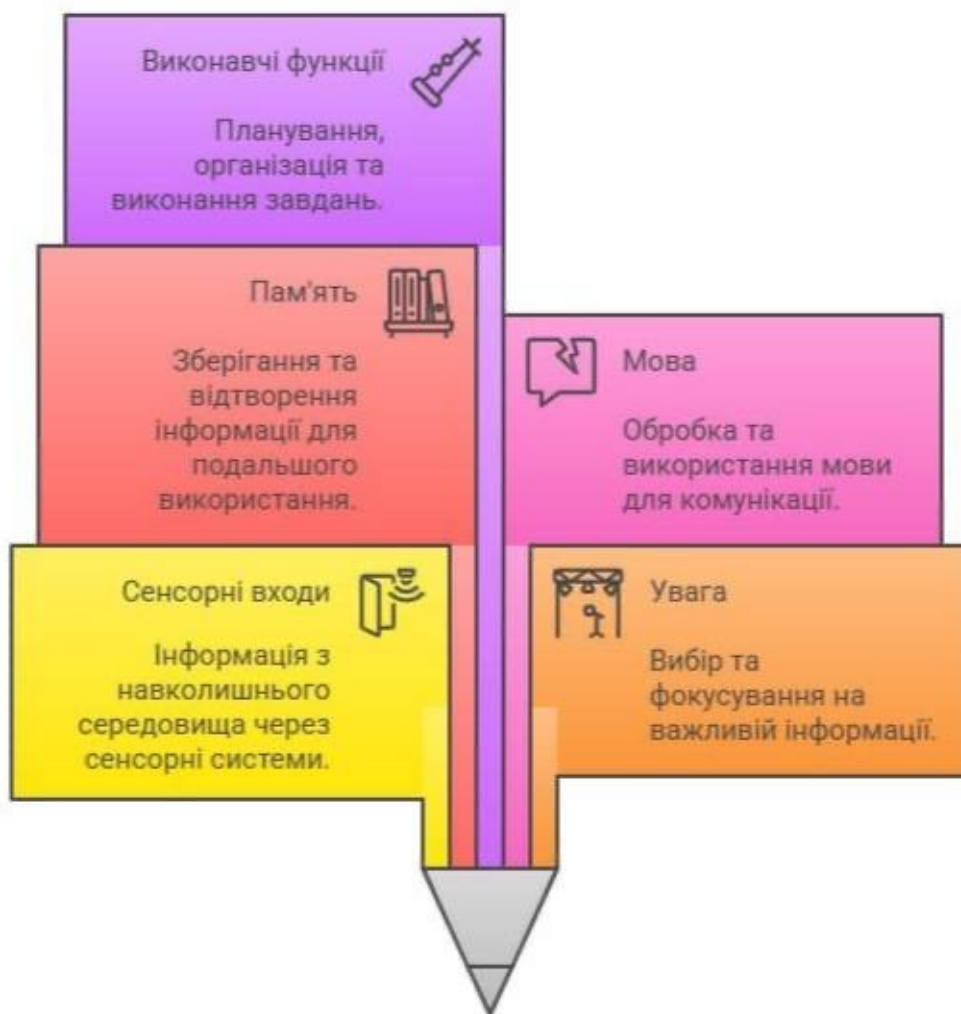


Рис. 5.4. Схема мультифокального когнітивного типу МОС
(розроблено автором на основі [293])

Адаптивно-когнітивний тип організаційно-мережевої структури є найбільш досконалою та інтелектуально насиченою формою еволюції когнітивних систем управління. Тип поєднує властивості мультифокальної структури з інструментами машинного навчання, прогностичної аналітики й автоматизованого прийняття рішень. Його головна відмінність полягає у здатності узгоджувати інформаційні потоки між численними учасниками, самостійно модифікувати власну архітектуру залежно від змін зовнішнього середовища, параметрів ефективності або нових стратегічних цілей.

У такій системі комунікаційна взаємодія між учасниками проєкту реалізується через когнітивно-аналітичний контур, котрий включає людські, машинні елементи — цифрових агентів, алгоритми оптимізації, предиктивні моделі та інтелектуальні платформи. Агенти здатні здійснювати контекстне навчання на основі минулих рішень, аналізувати відхилення від прогнозованих результатів і автоматично формувати рекомендації для корекції управлінських дій. У результаті система набуває властивостей самонавчання, самокорекції та адаптації, що дозволяє їй залишатися ефективною навіть за умов високої невизначеності, інформаційної турбулентності або кризових ситуацій [330].

Адаптивно-когнітивна структура функціонує на принципі гібридної взаємодії: людські учасники відповідають за стратегічну інтерпретацію й ухвалення кінцевих рішень, як інтелектуальні модулі виконують рутинний аналітичний і прогнозний аналіз, мінімізуючи когнітивне навантаження на управлінський персонал. Завдяки цьому забезпечується баланс між гнучкістю людського мислення та швидкістю обчислювальних процесів, що значно підвищує точність і своєчасність рішень. Ключовою рисою цієї структури є наявність динамічних зв'язків між фокусами, котрі перебудовуються у реальному часі відповідно до актуальних пріоритетів. Кожен підрозділ або цифровий агент має можливість змінювати роль у мережі — бути аналітичним, комунікаційним чи виконавчим вузлом залежно від поточної задачі.

Для математичного опису адаптивно-когнітивної системи доцільно використовувати інтегральну модель ефективності, яка поєднує людський та машинний компоненти:

$$F_4 = \beta \times F_3 + (1 - \beta) \times \phi(k_c, k_a), \quad (5.7)$$

де: F_3 — ефективність мультифокальної структури, β — коефіцієнт інтеграції людських рішень у загальну когнітивну систему ($0 \leq \beta \leq 1$), а функція $\phi(k_c, k_a)$ описує когнітивно-адаптивну взаємодію між рівнем узгодженості k_c і адаптивності k_a : $\phi(k_c, k_a) = e^{-(1-k_c)^2 - (1-k_a)^2}$

Вираз моделює зворотну залежність ефективності від ступеня розбалансованості системи: чим ближчі параметри k_c і k_a до одиниці, тим вищою є стабільність і продуктивність структури.

Розглянемо приклад розрахунку. Для системи, у якій мультифокальна ефективність становить $F_3 = 0,714$, інтеграційний коефіцієнт $\beta = 0,8$, когнітивна узгодженість $k_c = 0,95$, адаптивність $k_a = 0,9$, маємо:

$$\phi(k_c, k_a) = e^{-(1-0,95)^2 - (1-0,9)^2} = e^{-0,0025 - 0,01} = e^{-0,0125} \approx 0,988.$$

Тоді загальна ефективність системи дорівнює:

$$F_4 = 0,8 \times 0,714 + 0,2 \times 0,988 = 0,571 + 0,198 = 0,769.$$

Адаптивно-когнітивний тип демонструє інтегральну ефективність на рівні близько 77 %, що є найвищим серед усіх розглянутих моделей. Результат зумовлений не лише досконалістю комунікацій, а й наявністю внутрішніх механізмів прогнозування та самонавчання, котрі забезпечують постійне вдосконалення управлінських процесів [309].

На рисунку 5 представлено узагальнену схему адаптивно-когнітивного типу організаційно-мережевої структури, де зображено взаємодію між людськими та цифровими агентами, канали когнітивного зворотного зв'язку та інформаційні траєкторії автоматизованого аналізу даних.

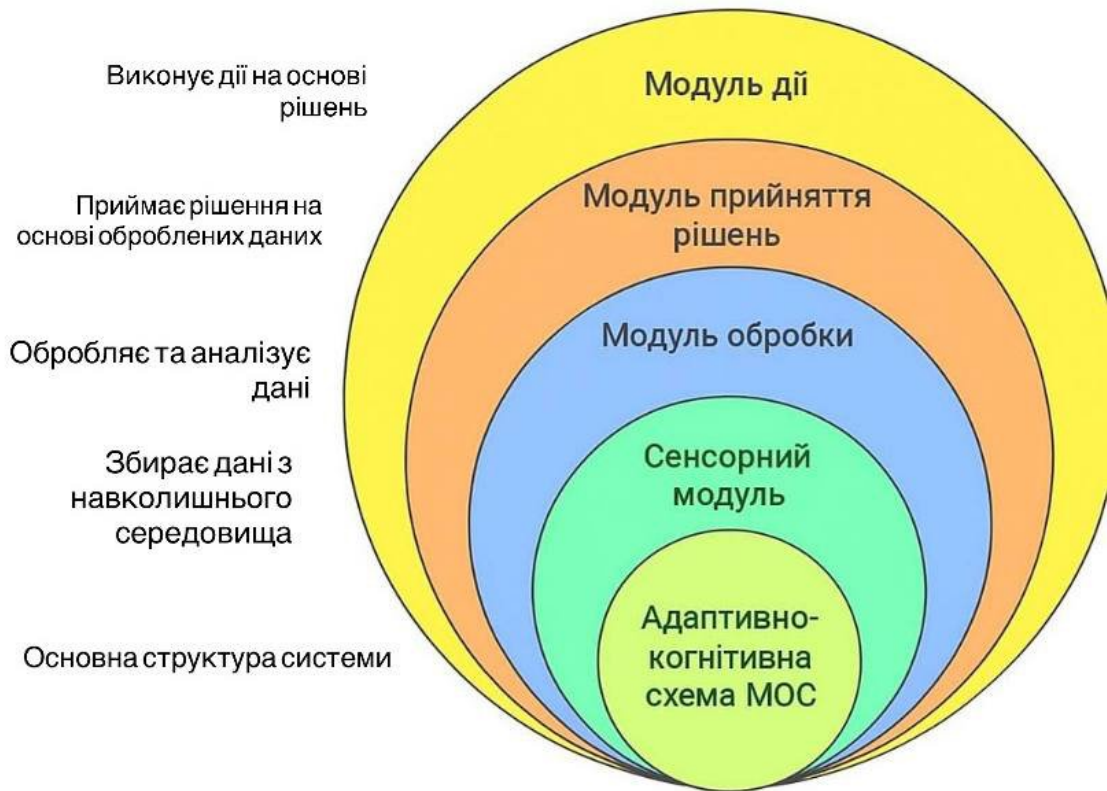


Рис. 5.5. Схема адаптивно-когнітивного типу МОС
(розроблено автором на основі [309])

Векторно-когнітивна модель комунікаційного процесу є формалізованим описом механізму інформаційної взаємодії між учасниками організаційно-мережевої структури, у якому управлінські рішення розглядаються як результат спрямованого когнітивного узгодження векторів намірів окремих суб'єктів системи. На відміну від традиційних комунікаційних схем, що передбачають лінійний рух інформації від відправника до отримувача, у когнітивній моделі обмін відбувається у багатовимірному просторі, де кожен акт комунікації формує вектор взаємодії, який має величину, напрям і кут відхилення від оптимального рішення. Кут символізує рівень когнітивної неузгодженості між учасниками, а зміна його значення у часі відображає процес навчання, узгодження позицій і наближення до консенсусу.

Кожен учасник мережі описується власним вектором намірів, а система загалом прагне до формування узагальненого вектора оптимального рішення R . Чим менший кут між цими векторами, тим вищим є рівень узгодженості та продуктивності

комунікаційного процесу. Для моделювання результативності взаємодії вводиться когнітивна функція активації, котра описує зниження ефективності при збільшенні відхилення:

$$\phi(\alpha) = e^{-\alpha^2}, \quad (5.8)$$

Функція має гаусівську форму й відображає природний процес «згасання когнітивної концентрації» — чим більша різниця у сприйнятті чи розумінні інформації між учасниками, тим менший реальний ефект комунікації.

Вектор результату комунікації визначається виразом:

$$|OM| = \cos \frac{\alpha}{2} \times \phi(\alpha), \quad (5.9)$$

де: $|OM|$ — величина проєкції узгодженого рішення на напрям оптимального вектора R . показник відображає не просто геометричну близькість позицій, а й інтелектуальний ступінь спільного розуміння.

Потенційна ефективність одного комунікаційного акту задається як: $f_0 = |OM|^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}$, що показує, як кількісна та когнітивна складові впливають на підсумковий результат.

Порівняльний аналіз типів когнітивних організаційно-мережових структур дає змогу виявити закономірності зростання ефективності управлінських процесів залежно від рівня когнітивної інтеграції, гнучкості комунікацій і здатності системи до самонавчання. Розвиток від фокального до адаптивно-когнітивного типу відображає еволюцію від централізованої моделі з обмеженим зворотним зв'язком до інтелектуальної, саморегульованої архітектури, де кожен елемент передає інформацію, бере участь у її осмисленні та прогнозуванні наслідків рішень.

Фокальний тип демонструє стабільність і простоту управління, однак характеризується низьким рівнем когнітивної гнучкості та значним ризиком перевантаження центрального вузла. Його ефективність обмежується можливостями аналітичного ядра, тому при збільшенні кількості учасників система швидко втрачає адаптивність. Динамічний тип, навпаки, забезпечує розподілену взаємодію та колективне навчання, що підвищує швидкість обміну даними і зменшує затримки у прийнятті рішень. Надмірна кількість зв'язків ускладнює керування інформаційними потоками, знижуючи структурну стійкість системи.

Мультифокальний когнітивний тип долає недоліки завдяки введенню кількох аналітичних центрів, котрі формують автономні, але взаємопов'язані підмережі. Підхід поєднує централізований контроль і горизонтальну координацію, забезпечуючи високу ефективність при значній кількості учасників. Кожен фокус спеціалізується на певному аспекті управління, а когнітивна взаємодія між ними формує єдину інтелектуальну систему, здатну до колективного прийняття рішень [366].

Найвищий рівень ефективності демонструє адаптивно-когнітивна модель, котра доповнює мультифокальну архітектуру елементами штучного інтелекту, машинного навчання та предиктивної аналітики. У ній формується подвійний контур управління — людський і машинний, що працюють у взаємній когерентності. Завдяки цьому система

набуває властивостей самонавчання, прогнозування і динамічної перебудови комунікацій, що забезпечує стабільну ефективність за умов інформаційної невизначеності або змін зовнішнього середовища [298].

Для узагальнення кількісних результатів розрахунків та наочного відображення взаємозв'язку між структурним типом організаційно-мережевої системи й рівнем її когнітивної ефективності наведено порівняльні показники у таблиці 1. Вона демонструє, як зміна архітектури управлінської мережі — від фокальної до адаптивно-когнітивної — впливає на зростання інтегрального коефіцієнта ефективності. Представлені дані підтверджують, що посилення когнітивної взаємодії, підвищення адаптивності та впровадження механізмів машинного навчання поступово збільшують загальну результативність системи, формуючи стійку тенденцію до переходу від централізованих до інтелектуально розподілених моделей управління [329].

Таблиця 5.1.

Порівняльні показники ефективності типів когнітивних організаційно-мережевих структур (розроблено автором на основі [329])

Тип когнітивної МОС	Формула розрахунку	Ефективність F_i
Фокальний	$F_1 = k_1 \times k_c \times F_0$	0,36
Динамічний	$F_2 = k_2 \times k_c^2 \times k_a \times F_0$	0,39
Мультифокальний	$F_3 = k_3 \times (k_c \times k_a)^{\frac{1}{2}} \times \sum w_i F_{0i}$	0,71
Адаптивно-когнітивний	$F_4 = \beta F_3 + (1 - \beta) \phi(k_c, k_a)$	0,77

Графічне відображення результатів порівняльного аналізу наведено на рисунку 6.



Рис. 5.6. Порівняння ефективності типів когнітивних МОС (розроблено автором на основі [274])

На рисунку показано зміну інтегрального показника ефективності залежно від типу когнітивної організаційно-мережевої структури [353]. Крива зростання демонструє поступовий перехід від лінійно-централізованої системи до адаптивної когнітивної мережі з елементами самонавчання. Спостерігається чітка тенденція підвищення ефективності з кожним рівнем ускладнення структури: від фокального типу, де переважає централізоване управління, до адаптивно-когнітивного, у якому формується повноцінна інтеграція людських та цифрових агентів [354]. Залежність підтверджує, когнітивна інтеграція, взаємне навчання та адаптивність є ключовими чинниками зростання ефективності управлінських процесів у складних проєктно-виробничих системах.

5.2. Математична модель оцінки синергетичного ефекту впровадження інтегрованих BIM-систем

Оцінка синергетичного ефекту у сучасному будівництві набуває ключового значення, впровадження BIM-систем (Building Information Modeling) істотно змінює логіку управління інвестиційно-виробничими процесами, переводячи їх у площину інтегрованого інформаційного середовища. У межах цифрових проєктів зникає жорстка межа між етапами планування, проєктування, виконання і експлуатації, кожен учасник отримує доступ до єдиного когнітивного простору даних. Інтеграція створює нову якість взаємодії між суб'єктами, що проявляється у підвищенні узгодженості рішень, зниженні транзакційних втрат і скороченні часових лагів між управлінськими циклами. Відповідно, виникає необхідність у кількісному визначенні ефекту, котрий отримується у вигляді економії ресурсів та через формування доданої вартості, зумовленої когнітивно-інформаційним зростанням системи.

Синергія у контексті BIM-інтеграції розглядається як приріст ефективності, що виникає внаслідок поєднання інформаційних, управлінських і комунікаційних потоків у єдину мережеву структуру. Вона виражається в збільшенні фінансових показників та у якісних змінах організаційних процесів: прискоренні координації між підрядниками, скороченні кількості колізій у проєктних рішеннях, підвищенні точності планування строків і ресурсів. Іншими словами, синергія в BIM-середовищі — це не просто сума окремих вигод від цифровізації, а результат нелінійного взаємного підсилення інформаційних і управлінських компонентів, коли система в цілому функціонує ефективніше, ніж сукупність її частин. Ефект має матеріальний та нематеріальний вимір: матеріальний виражається у зменшенні витрат та зростанні прибутку, тоді як нематеріальний — у покращенні когнітивної узгодженості, прозорості процесів і якості прийнятих рішень [341].

Необхідність формалізації синергетичного ефекту обумовлює застосування комбінованого математичного підходу, що поєднує елементи трьох методів: витратного, порівняльного та дохідного. Витратний підхід дозволяє визначити вартісну базу інтеграції — сукупність витрат на впровадження BIM-системи, включно з навчанням персоналу, придбанням обладнання та адаптацією програмного середовища. Порівняльний підхід забезпечує можливість зіставлення результатів між підприємствами, котрі функціонують у традиційній структурі, та тими, що перейшли на інтегровану BIM-модель. Дохідний підхід, у свою чергу, дає змогу кількісно оцінити зростання вартості бізнесу через приріст грошових потоків, що генеруються завдяки синергії. Поєднання трьох підходів дозволяє

отримати найбільш об'єктивну модель, у якій враховується економічна та когнітивна складова ефективності.

Актуальність оцінки синергетичного ефекту полягає у тому, що вона створює основу для кількісного виміру результативності цифрової інтеграції у будівництві. Без такої оцінки неможливо коректно визначити доцільність інвестицій у BIM-технології, оптимізувати структуру витрат і довести економічну раціональність цифрової трансформації. Впровадження відповідних моделей дозволяє перетворити процес управління з інтуїтивного на науково обґрунтований, із прогнозованим результатом.

На рисунку 5.7 представлено концептуальну схему формування синергетичного ефекту BIM-інтеграції, що відображає взаємозв'язок між інформаційними потоками, когнітивними елементами системи, управлінськими рішеннями та економічними результатами, котрі виникають унаслідок їх інтеграції.

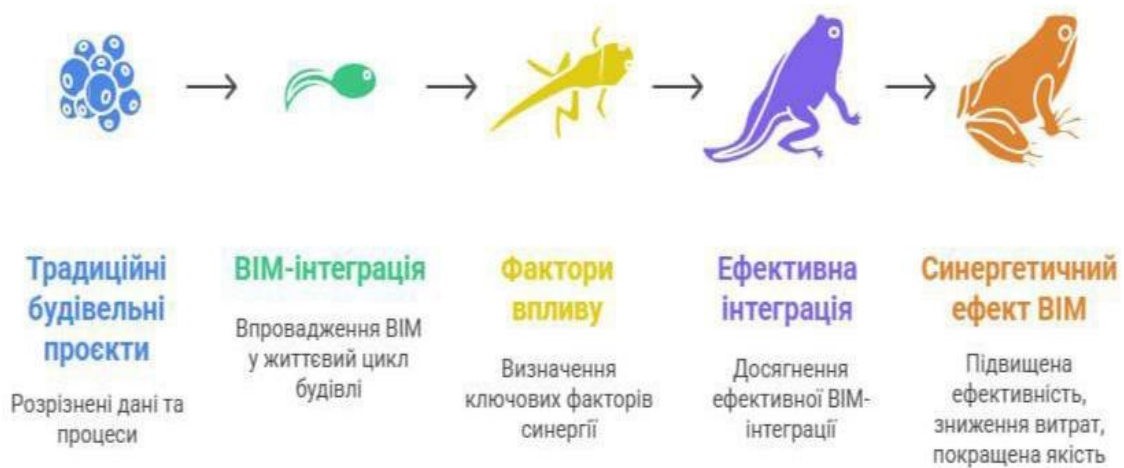


Рис. 5.7. Концептуальна схема формування синергетичного ефекту BIM-інтеграції
(розроблено автором на основі [365])

Одним із найвідоміших підходів до оцінки синергії є метод, запропонований А. Damodaran, котрий широко застосовується для аналізу угод злиття та поглинання (M&A). Його суть полягає у визначенні інтегральної вартості цільового підприємства після злиття як суми автономної вартості, вартості синергії та контрольної премії.

У виразі відображається логіка того, що кінцева ціна поглинання перевищує ринкову оцінку компанії на величину очікуваних синергій, тобто додаткових вигод, котрі інвестор прогнозує отримати після інтеграції активів, технологій і управлінських систем. Damodaran розробив показник чистої вартості поглинання (Net Acquisition Value, NAV), котрий обчислюється як різниця між сукупною вартістю інтегрованої структури та сумою витрат на придбання і супровід процесу. Метод дозволяє визначити, чи є інтеграція економічно доцільною, та чи перевищує очікуваний ефект фактичні витрати на злиття.

Вагомий внесок у розробку моделей синергії в інвестиційно-будівельній сфері зробила Є.А. Храмова, котра запропонувала формалізовану систему оцінки синергетичного ефекту від кооперації бізнес-одиниць у межах холдингових структур.

$$Value_{target} = Value_{target}^{stand-alone} + Value_{synergies} + Control\ Premium, \quad (5.10)$$

де: $Value_{target}$ — інтегральна вартість цільового підприємства після об'єднання; $Value_{target}^{stand-alone}$ — автономна вартість підприємства до інтеграції; $Value_{synergies}$ — вартість синергії, отриманої після злиття або кооперації; $Control\ Premium$ — премія, що відображає додаткову суму, яку покупець сплачує, очікуючи майбутню вигоду від синергії.

Щоб продемонструвати практичну логіку розрахунку, розглянемо умовний приклад. Якщо автономна вартість підприємства становить 100 млн грн, очікувана синергія — 15 млн грн, а контрольна премія — 5 млн грн, то: $Value_{target} = 100 + 15 + 5 = 120$ млн грн.

Таким чином, ефект інтеграції підвищує ринкову вартість на 20 %.

Контрольна премія розраховується як різниця між кінцевою ціною придбання і ринковою вартістю цільової компанії: $Control\ Premium = FinalAcquisition\ Price - MarketValueoftheTarget$

Наприклад, якщо компанія придбана за 120 млн грн при ринковій оцінці 100 млн грн, премія становить 20 млн грн. Означає, що інвестор очікує отримати не менше цієї величини у вигляді додаткової вигоди від синергії.

Для комплексного оцінювання інтеграції Damodaran запропонував показник чистої вартості поглинання (Net Acquisition Value, NAV), який визначає різницю між об'єднаною вартістю компаній та сумою їх автономних вартостей і витрат на злиття:

$$NAV = (V_{ij} - (V_i + V_j)) - (P + E), \quad (5.11)$$

де: NAV — чиста вартість поглинання; V_{ij} — об'єднана вартість інтегрованої компанії; V_i, V_j — автономні вартості компаній і та j; P — премія за придбання; E — витрати, пов'язані з процесом інтеграції.

Якщо $V_{ij} = 250$ млн грн, $V_i = 120$ млн грн, $V_j = 100$ млн грн, $P = 20$ млн грн, $E = 5$ млн грн, тоді $NAV = (250 - (120 + 100)) - (20 + 5) = (30) - 25 = 5$ млн грн.

Додатне значення NAV свідчить про наявність позитивного синергетичного ефекту.

Згідно з підходом С.А. Орехова, синергетичний ефект інтеграції визначається через сукупність додаткових прибутків, економії витрат та податкові вигоди, що виникають у результаті об'єднання:

$$C_n = D(PN)_n + D(PA)_n + (EE)_n - DIn_n + DT_n + I_0, \quad (5.12)$$

де: C_n — розрахунковий період часу; $D(PN)_n$ — додатковий прибуток від розширення масштабів діяльності; $D(PA)_n$ — прибуток від зниження ризиків та диверсифікації; $(EE)_n$ — економія поточних витрат; DIn_n — інвестиції в реконструкцію та

розширення; DT_n — економія податкових платежів; I_0 — початкові інвестиції в інтеграційний процес.

Для прикладу, якщо:

$D(PN)_n = 3$ млн грн, $D(PA)_n = 2$ млн грн, $(EE)_n = 1,5$ млн грн, $DIn_n = 1$ млн грн, $DT_n = 0,5$ млн грн, $I_0 = 0,5$ млн грн, тоді $C_n = 3 + 2 + 1,5 - 1 + 0,5 + 0,5 = 6,5$ млн грн.

Інтеграційна вигода за період становить 6,5 млн грн.

Ряд авторів пропонують застосовувати дохідний підхід, у межах якого синергію оцінюють через дисконтування грошових потоків, отриманих унаслідок інтеграції:

$$S = \sum_{t=1}^T \frac{\Delta CF_t}{(1+R)^t}, \quad (5.13)$$

де: ΔCF_t — різниця між грошовими потоками інтегрованої системи та сумою потоків окремих компаній у момент часу t ; R — ставка дисконтування, що враховує вартість капіталу; T — період розрахунку.

Якщо протягом трьох років очікується приріст потоків:

$\Delta CF_1 = 2,0$, $\Delta CF_2 = 3,0$, $\Delta CF_3 = 4,0$ млн грн, а ставка дисконтування $R = 0,1$, тоді $S = \frac{2}{1,1} + \frac{3}{(1,1)^2} + \frac{4}{(1,1)^3} = 1,82 + 2,48 + 3,00 = 7,3$ млн грн.

Отримане значення показує сумарну поточну вартість синергетичного ефекту за трирічний період.

Візуалізація взаємозв'язку змінних і потоків інформації дає змогу наочно продемонструвати механізм формування синергетичного ефекту у процесі інтеграції підприємств, що реалізують ВІМ-підхід [177]. У межах моделі «злиття та поглинання» (М&А) синергія виникає як результат фінансового поєднання активів та через формування єдиного інформаційно-когнітивного простору, у якому здійснюється обмін даними, знаннями та управлінськими рішеннями між усіма учасниками системи. На рисунку 5.8 відображено взаємозв'язки між ключовими змінними: інвестиційними потоками, витратами на інтеграцію, когнітивною ефективністю, приростом вартості та інформаційними каналами, що забезпечують координацію цих процесів. Структура демонструє, як інформаційні потоки впливають на фінансові результати, створюючи нелінійну залежність між інтелектуальними ресурсами, організаційними рішеннями та економічним ефектом інтеграції [326].

Логіка моделі полягає в тому, що інтеграційний ефект вважається позитивним, якщо вартість об'єднаної структури перевищує суму автономних вартостей окремих підприємств і всіх супровідних витрат. Показник NAV демонструє «чистий залишок» вигоди, котрий залишається після покриття премії за придбання та організаційних витрат інтеграції.

Щоб продемонструвати застосування цієї моделі на практиці, розглянемо умовний приклад інтеграції двох компаній у сфері будівельного девелопменту. Нехай компанії А та В мають відповідно автономні вартості $V_A = 120$ млн грн і $V_B = 100$ млн грн. У результаті

інтеграції, завдяки впровадженню єдиної ВІМ-платформи управління, загальна оцінка інтегрованої компанії становить $V_{AB} = 250$ млн грн. При цьому витрати на інтеграцію (придбання програмного забезпечення, навчання персоналу, модернізація серверної інфраструктури, юридичний супровід) становлять $E = 5$ млн грн, а премія за придбання $P = 20$ млн грн.



Рис. 5.8. Структура інформаційно-вартісних потоків у системі M&A
(розроблено автором на основі [326])

Підставимо дані у формулу:

$$NAV = (250 - (120 + 100)) - (20 + 5) = (250 - 220) - 25 = 30 - 25 = 5 \text{ млн грн.}$$

Отримане значення $NAV = 5$ млн грн означає, що інтеграція є економічно доцільною, оскільки створений ефект перевищує витрати. Якщо б значення було від'ємним, це свідчило б про неефективність злиття або завищені очікування синергії.

Графічна інтерпретація співвідношення між чистою вартістю інтеграції та величиною контрольної премії дає змогу наочно оцінити динаміку зміни економічної доцільності інтеграційного процесу залежно від рівня витрат на придбання. На практиці між показником NAV та Control/Premium існує обернена залежність: із підвищенням розміру премії, котру інвестор сплачує за контроль над компанією, чиста вартість інтеграції зменшується, зростає фінансове навантаження. Водночас у межах оптимального діапазону премії (10–20% від ринкової вартості) інтеграційна угода може залишатися вигідною, якщо синергетичний ефект перевищує додаткові витрати.

На графіку наведено криву, що відображає зміну показника NAV при варіюванні величини контрольної премії, за фіксованих значень автономних вартостей компаній та інтеграційних витрат [367]. Ліва частина кривої демонструє зону зростання економічної вигоди, де синергія покриває додаткові витрати, тоді як права частина відображає зону перевитрат, у якій надмірна премія нівелює ефект від інтеграції. Рисунок 5.9 показує критичну точку рівноваги, вона визначає граничне значення, за межами якого злиття втрачає економічний сенс.



Рис. 5.9. Граф залежності NAV від Control Premium
(розроблено автором на основі [367])

Суть витратного підходу полягає у визначенні того, впровадження інтегрованої інформаційної системи дозволяє оптимізувати ресурси, підвищити ефективність внутрішніх операцій і скоротити дублювання функцій між підрозділами. Після інтеграції ВІМ-системи витрати на координацію між проєктними, інженерними, будівельними та експлуатаційними командами істотно зменшуються завдяки переходу до єдиного цифрового простору даних. Усувається потреба у багаторівневному погодженні

документації, що зазвичай супроводжує традиційні проекти, а кількість колізій і виправлень під час виконання робіт скорочується на 25–40 %, що безпосередньо відображається у зменшенні витратної частини [328].

У межах витратного підходу синергетичний ефект можна визначити як різницю між сумою витрат до інтеграції та витратами після впровадження системи, скориговану на інвестиції у створення BIM-інфраструктури. Підхід дозволяє кількісно визначити економічний результат у грошовому вимірі, що робить його універсальним для використання в інвестиційних розрахунках. Він придатний для оцінки ефекту на різних етапах життєвого циклу проекту — від проектування до експлуатації, дає змогу врахувати прямі та непрямі вигоди від цифрової інтеграції.

Витратний підхід має і стратегічний вимір: він дозволяє побачити, як короткострокові витрати на впровадження BIM-системи компенсуються довгостроковим зниженням витрат на координацію, контроль і технічне обслуговування. З часом система стає самопідтримуваною, оскільки накопичені дані та аналітичні модулі зменшують потребу у зовнішніх ресурсах для аналізу й прийняття рішень. Витратний підхід визначає фінансову ефективність впровадження, демонструє розвиток економіки знань у будівельному проєкті, коли когнітивна узгодженість учасників знижує витрати природним шляхом — через підвищення прозорості, усвідомленості та швидкості дій [319].

Формула відображає комплексний підхід до визначення синергетичного ефекту на основі витратного методу, котрий було адаптовано для оцінки інтеграційних процесів у будівельній галузі з урахуванням впровадження BIM/IPD-систем. Вона дозволяє врахувати фінансові, організаційно-управлінські параметри, що впливають на загальний результат об'єднання. На відміну від спрощених моделей, де ефект оцінюється лише через приріст прибутку, вираз враховує сукупність факторів — від економії поточних витрат до податкових стимулів і початкових інвестицій у цифрову інтеграцію. Формула відображає системний характер синергії, котра виникає не одномоментно, а формується поступово через оптимізацію всіх елементів управлінської структури.

Розглянемо умовний приклад. При впровадженні інтегрованої BIM/IPD системи у будівельній компанії отримано дані за рік: $D(PN)_n = 4,0$ млн грн (приріст прибутку від масштабування), $D(PA)_n = 1,5$ млн грн (зниження ризиків та втрат), $(EE)_n = 2,2$ млн грн (економія операційних витрат), $DIn_n = 1,2$ млн грн (додаткові інвестиції у модернізацію), $DT_n = 0,6$ млн грн (податкові пільги), $I_0 = 0,8$ млн грн (початкові інвестиції у цифрову інфраструктуру).

$$\text{Тоді: } C_n = 4,0 + 1,5 + 2,2 - 1,2 + 0,6 + 0,8 = 7,9 \text{ млн грн.}$$

Отримане значення $C_n = 7,9$ млн грн демонструє позитивний результат інтеграції, що підтверджує економічну доцільність впровадження BIM-системи. Авторський підхід у даній формулі полягає у поєднанні класичного економічного розрахунку з урахуванням когнітивної вартості управлінських рішень — тобто тієї частини ефекту, яка виникає завдяки підвищенню інформаційної прозорості, узгодженості дій і швидкості реагування у цифровому середовищі.

Порівняльна оцінка синергії в будівництві передбачає аналіз вартості проєктів, що реалізуються з використанням BIM/IPD технологій, відносно аналогічних проєктів,

виконаних у традиційних умовах. У цьому разі синергетичний ефект визначається як різниця між результативністю двох підходів: цифрового (інтегрованого) і класичного (роз'єданого). Показниками порівняння можуть виступати зниження витрат, скорочення строків, підвищення точності прогнозів, зменшення кількості змін у проєктній документації, а також приріст вартості активів після впровадження інтелектуальної системи управління. Метод дозволяє кількісно оцінити безпосередній економічний ефект, цінність інформаційної інтеграції як стратегічного активу компанії [333].

Основна перевага порівняльного підходу полягає у його простоті та практичній наочності, однак у будівельній сфері він стикається з рядом обмежень. По-перше, значна різноманітність проєктів і відмінності у масштабі, технологічних умовах чи географічних факторах ускладнюють коректне порівняння. Навіть два об'єкти, що належать до однієї категорії, можуть відрізнятися за структурою витрат, організацією робіт чи рівнем автоматизації. По-друге, синергетичні ефекти у BIM-системах проявляються не одразу — вони мають накопичувальний характер і стають відчутними лише після кількох управлінських циклів. Ускладнює безпосереднє порівняння результатів короткострокових проєктів.

Порівняльний підхід у будівництві може бути ефективним лише за умов його адаптації до цифрового контексту. Необхідно доповнювати його елементами когнітивної аналітики, що дозволяють враховувати фінансові показники та інформаційно-комунікаційні ефекти. Порівняльна оцінка має базуватися не на прямій ринковій вартості, а на інтегрованій ефективності — тобто здатності системи генерувати додаткову цінність завдяки цифровим технологіям, автоматизації та взаємодії між учасниками. У результаті підхід перетворюється з простого ринкового порівняння на аналітичний інструмент стратегічного вимірювання ефектів цифрової трансформації у будівництві [338].

На схемі, поданій на рисунку 5.10, відображено логіку узгодження між вартісними витратами на впровадження інтелектуальної системи управління та вигодами, що генеруються внаслідок її функціонування. Модель демонструє, що максимальний синергетичний ефект досягається у точці когнітивної рівноваги, де маргінальна вигода від цифрової інтеграції дорівнює граничним витратам на її підтримку. У цій зоні система працює найбільш ефективно, додаткові інвестиції не викликають зменшення результативності, а забезпечують стабільне зростання загальної вартості проєкту.

Суть дохідного підходу полягає у визначенні чистого синергетичного потоку — різниці між грошовими потоками інтегрованої структури та сумою потоків окремих елементів до інтеграції. Отриманий результат приводиться до теперішньої вартості з урахуванням ставки дисконтування, що відображає середньозважену вартість капіталу або ризиковість проєкту [331].

Якщо очікувані додаткові грошові потоки становлять 2,0, 3,0 та 4,0 млн грн протягом трьох років при ставці дисконту $R = 0,1$, тоді:

$$S = \frac{2}{1,1} + \frac{3}{(1,1)^2} + \frac{4}{(1,1)^3} = 1,82 + 2,48 + 3,00 = 7,3 \text{ млн грн.}$$

Отримане значення свідчить, що сукупний синергетичний ефект за три роки має поточну вартість 7,3 млн грн.



Рис. 5.10. Модель узгодження витрат і вигід у когнітивно-інтегрованому середовищі (розроблено автором на основі [331])

Для детальнішого представлення структури грошових потоків доцільно розкласти їх на окремі складові, що формують сукупний ефект. Відповідно до модифікованої моделі, синергетичний потік можна подати у вигляді:

$$\Delta CF_t = \Delta R_t - \Delta C_t - \Delta T_t - \Delta I_t, \quad (5.14)$$

де: ΔR_t — приріст доходів, отриманий завдяки інтеграції системи (наприклад, через підвищення продуктивності або швидше завершення проєктів); ΔC_t — скорочення операційних витрат, що виникає через автоматизацію процесів; ΔT_t — зміни податкових зобов'язань (у більшості випадків — економія завдяки ефективнішому обліку); ΔI_t — додаткові інвестиційні витрати, необхідні для підтримки BIM/IPD системи.

Вираз дозволяє визначити чисту синергетичну вигоду, розділивши вплив факторів доходу, витрат і податків.

Узагальнюючи отримані результати, можна записати інтегральну формулу теперішньої вартості синергетичного ефекту:

$$S = \sum_{t=1}^T \frac{(\Delta R_t - \Delta C_t - \Delta T_t - \Delta I_t)}{(1+R)^t}, \quad (5.15)$$

Вона є основою для аналітичного розрахунку ефективності інтеграції у будівельному проєкті. У цьому рівнянні кожен додатковий параметр відображає окрему складову ефекту — від підвищення доходів до оптимізації податкових потоків. У BIM/IPD середовищі ця модель дозволяє оцінити ефект не лише у фінансовому, а й у когнітивно-управлінському вимірі, оскільки зниження витрат і приріст доходів є наслідком підвищення узгодженості інформації, автоматизації процесів та підвищення точності прийняття рішень.

Для прикладу, якщо у першому році очікуваний приріст доходів $\Delta R_t = 3,5$ млн грн, економія витрат $\Delta C_t = 1,2$ млн грн, податкові заощадження $\Delta T_t = 0,4$ млн грн, а додаткові інвестиції $\Delta I_t = 0,6$ млн грн, то

$$\Delta CF_1 = 3,5 - 1,2 - 0,4 - 0,6 = 1,3 \text{ млн грн.}$$

Після дисконтування при ставці $R = 0,1$:

$$\frac{1,3}{1,1} = 1,18 \text{ млн грн.}$$

Чиста поточна вартість синергетичного ефекту за перший рік становить 1,18 млн грн.

На рисунку 5.11 подано узагальнену модель цієї динаміки, де показано співвідношення між початковими інвестиціями, економією ресурсів і приростом доходів у часі. Зона перетину кривих витрат і вигід позначає момент досягнення «точки когнітивного балансу» — періоду, коли система починає генерувати сталий позитивний синергетичний ефект [320]. Після цього спостерігається різке зростання чистих грошових потоків, зумовлене ефектом накопичення даних, підвищенням автоматизації аналітики та розширенням цифрової взаємодії між учасниками проєкту.

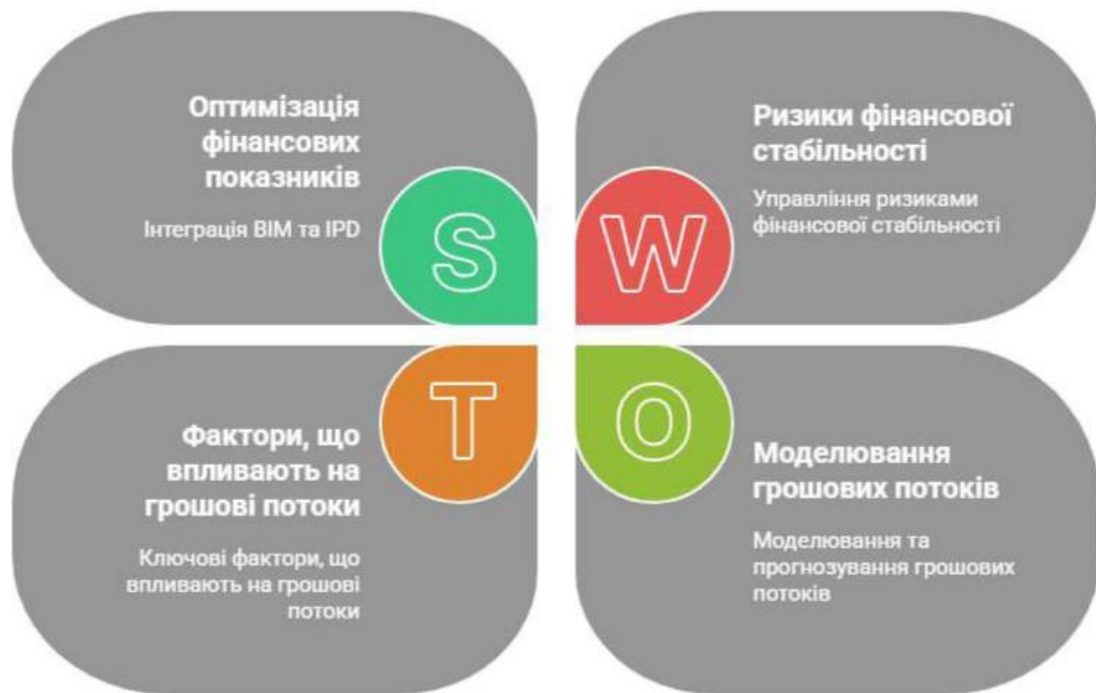


Рис. 5.11. Динаміка інтегрованих грошових потоків BIM/IPD системи
(розроблено автором на основі [320])

Класичні методи оцінки синергетичного ефекту, що традиційно застосовуються у фінансово-економічній практиці, виявляються недостатньо ефективними у контексті сучасної будівельної галузі, особливо при аналізі впровадження BIM/IPD систем. Основна причина полягає в тому, що підходи орієнтовані на статичні фінансові показники, не враховуючи когнітивну, інформаційну та процесну складові, котрі визначають ефективність цифрових інтеграцій. У будівельному середовищі, де результативність проекту формується через грошові потоки, через узгодженість даних, швидкість комунікації та адаптивність системи до змін, використання суто витратного або дохідного методу призводить до спрощення складної динаміки взаємодії [335].

Традиційні підходи ігнорують ефект мультиагентної взаємодії, котрий є фундаментальним для сучасних будівельних екосистем. Вони не розрізняють різні типи учасників — від цифрових модулів до людських агентів — і не враховують процеси самоорганізації, що відбуваються у межах когнітивної архітектури проекту. Оцінка синергії часто зводиться до арифметичної різниці між витратами та доходами, у той час як у BIM/IPD середовищі ефект формується переважно через якісні зміни — покращення координації, прогнозування, точності планування і зниження ймовірності управлінських помилок.

У зв'язку з цим постає необхідність створення авторської моделі оцінки синергетичного ефекту, котра враховує когнітивно-комунікаційний вимір і відображає взаємодію між інформаційними потоками, управлінськими рішеннями та економічними результатами. Модель має виходити за межі класичних фінансових розрахунків, інтегруючи у себе механізми машинного навчання, аналізу даних і адаптивної оптимізації.

Її інноваційність полягає в тому, що вона розглядає синергію як приріст прибутку та як еволюційний ефект когнітивного узгодження системи, де ефективність управління визначається здатністю учасників спільно формувати нову цінність через цифрову взаємодію [303].

Таблиця демонструє, що перехід від традиційних до когнітивних методів дозволяє розширити рамки економічного аналізу, включивши до нього нематеріальні чинники — когнітивну узгодженість, ефект самоорганізації та якість управлінських рішень. Дас змогу отримати більш точну оцінку реального синергетичного потенціалу інтегрованих BIM/IPD систем, котрий у класичних моделях часто залишається прихованим або недооціненим [296].

Категоризація витрат у межах когнітивно-інтегрованої моделі оцінювання синергетичного ефекту є ключовим елементом, що забезпечує можливість побудови достовірного інтегрального показника ефективності. У традиційних підходах витрати розглядаються як однорідна економічна величина, у контексті впровадження BIM/IPD систем вони набувають складної багаторівневої структури, котра включає фінансові, інформаційні, організаційні та когнітивні компоненти. Коректне визначення категорій витрат дозволяє оцінити прямі грошові вкладення та нематеріальні ресурси, що забезпечують функціонування інтелектуальної системи управління.

Таблиця 5.2.

Порівняння класичних і когнітивно-інтегрованих підходів до оцінки синергетичного ефекту (розроблено автором на основі [296])

Критерій порівняння	Класичні підходи (витратний, дохідний, порівняльний)	Когнітивно-інтегрований підхід (авторська модель)
<i>Методологічна основа</i>	Базується на статичних фінансових моделях і бухгалтерських показниках	Ґрунтується на динамічній системній оцінці, що враховує когнітивні, інформаційні та управлінський взаємодії
<i>Предмет оцінки</i>	Вартість активів, витрати, прибуток, грошові потоки	Інтегральна ефективність системи - поєднання фінансових, інформаційних і когнітивних ефектів
<i>Тип ефекту</i>	Лінійний, одноразовий, обмежений часовими рамками проекту	Нелінійний, накопичувальний, з ефектом самоорганізації та навчання системи
<i>Джерело синергії</i>	Економія витрат, приріст прибутку, скорочення дублювання функцій	Інтелектуальна взаємодія агентів, когнітивна узгодженість, адаптивність управлінських процесів
<i>Інформаційна база</i>	Фінансова звітність, кошторисні	Інтегровані дані BIM/IPD середовища, аналітичний

	показники, дані ринку	модуль, потоки рішень і зворотних зв'язків
<i>Одиниця виміру ефекту</i>	Грошовий еквівалент (вартість, дохід, економія)	Комплексний показник ефективності, що поєднує економічну та когнітивну складові
<i>Рівень точності прогнозування</i>	Середній, залежить від стабільності зовнішніх факторів	Високий, завдяки застосуванню машинного навчання, аналітики даних і когнітивного моделювання
<i>Обмеження підходу</i>	Не враховує нематеріальні ефекти, уповільнено реагує на зміни середовища	Вимагає складної інформаційної інфраструктури, але забезпечує глибше системне бачення ефективності
<i>Тип управлінського рішення, що підтримується</i>	Тактичний, орієнтований на фінансові результати	Стратегічний, орієнтований на довгострокову адаптацію та когнітивну стійкість системи
<i>Очікуваний результат впровадження</i>	Зниження витрат або приріст прибутку у короткостроковому періоді	Стійке підвищення ефективності управління, прозорості рішень і довгострокової вартості системи

Рисунок 5.12 демонструє структурну взаємодію між базовими параметрами моделі: інтенсивністю інформаційних потоків І, когнітивною інтегрованістю СІ, комунікаційною організованістю СО та частковими синергетичними ефектами. Модель ілюструє, що максимальний інтегральний ефект досягається в точці збалансованої когнітивної взаємодії, де інформаційні потоки синхронізовані, комунікаційна структура оптимізована, а система демонструє здатність до самонавчання [304].

У структурі витрат доцільно виділяти три основні рівні. Перший рівень становлять капітальні витрати, пов'язані з первинною інфраструктурою BIM/IPD — придбанням програмного забезпечення, ліцензій, серверного обладнання, налаштуванням мережевих каналів і створенням інтеграційних модулів. Витрати мають довгостроковий характер і визначають потенціал системи до розвитку. Другий рівень — операційні витрати, котрі охоплюють обслуговування, підтримку, оновлення цифрової платформи, навчання персоналу, витрати на зберігання даних і підтримку кібербезпеки.



Рис. 5.12. Узагальнена когнітивна модель оцінки ефекту BIM/IPD інтеграції
(розроблено автором на основі [304])

Вони формують змінну частину бюджету та безпосередньо впливають на рентабельність інтеграційного процесу. Третій рівень — когнітивно-організаційні витрати, що охоплюють ресурси, спрямовані на управління знаннями, аналітичне моделювання, комунікаційне узгодження між підрозділами й адаптацію управлінських структур до цифрових форматів [310].

Рисунок 5.13 відображає баланс між цими двома категоріями, демонструючи поступове зниження частки інвестиційних витрат у загальній структурі бюджету за рахунок зростання продуктивності та когнітивної узгодженості системи. Динаміка підтверджує, що у BIM/IPD середовищі головним джерелом економічного ефекту стає не зменшення витрат у традиційному розумінні, а підвищення інтелектуальної віддачі від кожної інвестиційної одиниці.



Рис. 5.13. Структура інвестиційних і експлуатаційних витрат у BIM/IPD системі
(розроблено автором на основі [310])

На рисунку 5.14 подано узагальнену залежність, що ілюструє еволюцію системи від стану «інвестиційного навантаження» до стану «когнітивної віддачі».



Рис. 5.14. Графічна інтерпретація інтегрального ефекту впровадження BIM/IPD
(розроблено автором на основі [310])

Точка перетину кривих позначає момент досягнення ефекту рівноваги, коли дисконтовані вигоди дорівнюють приведеним витратам, а подальше зростання вигід свідчить про вихід системи у фазу сталого самопідсилення. Графік також демонструє, що після досягнення критичного рівня когнітивної зрілості система починає генерувати приріст ефективності експоненційно, що відповідає закономірностям нелінійного розвитку інтелектуальних управлінських середовищ [271].

5.3. Алгоритмічні підходи до оптимізації процесів управління на основі когнітивного аналізу

Сучасні системи управління характеризуються надзвичайною складністю, динамічністю зовнішнього середовища та високим рівнем інформаційної насиченості, що зумовлює необхідність переходу від класичних алгоритмів оптимізації до когнітивно-орієнтованих моделей. Традиційні підходи, засновані на статичних або лінійних математичних залежностях, виявляються недостатніми в умовах, коли процес прийняття рішень потребує адаптації до багатовимірних потоків даних, неповної інформації та постійно змінних цілей системи. Когнітивний підхід, на відміну від традиційного, враховує нелінійні зв'язки між параметрами, здатність системи до самонавчання та перебудови логіки дій залежно від контексту.

У межах когнітивно-алгоритмічного підходу управлінська система розглядається як динамічна множина агентів, кожен з яких виконує функцію, накопичує досвід, інтерпретує інформацію та формує локальні рішення. Взаємодія агентів створює ефект колективного інтелекту — узгодженої поведінки, що дозволяє системі досягати глобальної оптимальності без жорстко визначеного центра управління. Оптимізація у цьому контексті вже не є пошуком єдиного найкращого рішення, а виступає як безперервний процес адаптації, що враховує історію попередніх станів, рівень невизначеності та когнітивний потенціал кожного елемента системи [319].

Важливим є те, що когнітивні алгоритми працюють із багатовимірними інформаційними взаємодіями — обробляють числові дані, інтегрують семантичні, контекстуальні та поведінкові параметри. Завдяки цьому вони формують узагальнене розуміння ситуації, на основі якого система може прогнозувати розвиток подій і змінювати власні стратегії у реальному часі. А ідхід дозволяє підвищити точність і швидкість обчислень, створити інтелектуальне середовище управління, у якому оптимізаційні процеси є саморегульованими і спроможними до самовідтворення.

Когнітивно-алгоритмічний підхід до оптимізації управлінських процесів ґрунтується на ідеї інтеграції інтелектуальних механізмів аналізу, прогнозування та самонавчання в єдиний адаптивний контур прийняття рішень. Його сутність полягає у переході від формальних, статичних моделей до гнучких систем, здатних розуміти контекст, інтерпретувати зміни у середовищі та перебудовувати власну логіку дій. На відміну від традиційних методів, що працюють із фіксованими параметрами, когнітивна оптимізація враховує поведінкові, інформаційні й комунікаційні залежності між елементами системи, формуючи багатовимірну картину процесів [301].

У моделі центральне місце посідає когнітивний агент — аналітична сутність, котра обробляє дані, створює причинно-наслідкові зв'язки між подіями, виявляє закономірності, навчається на досвіді та прогнозує наслідки управлінських дій. Агентна взаємодія між різними рівнями системи забезпечує ефект самоорганізації, коли оптимізація виникає з узгоджених дій множини автономних елементів, які спільно прагнуть до системної рівноваги, котрі дає змогу досягати оптимальних результатів за умов неповної або суперечливої інформації [340].

На основі викладених положень формується концептуальна модель, що відображає взаємодію когнітивних, аналітичних і управлінських блоків у єдиному

оптимізаційному контурі. Вона демонструє, як інформаційні потоки трансформуються у рішення через процеси навчання, адаптації та прогнозування (рис. 5.15).

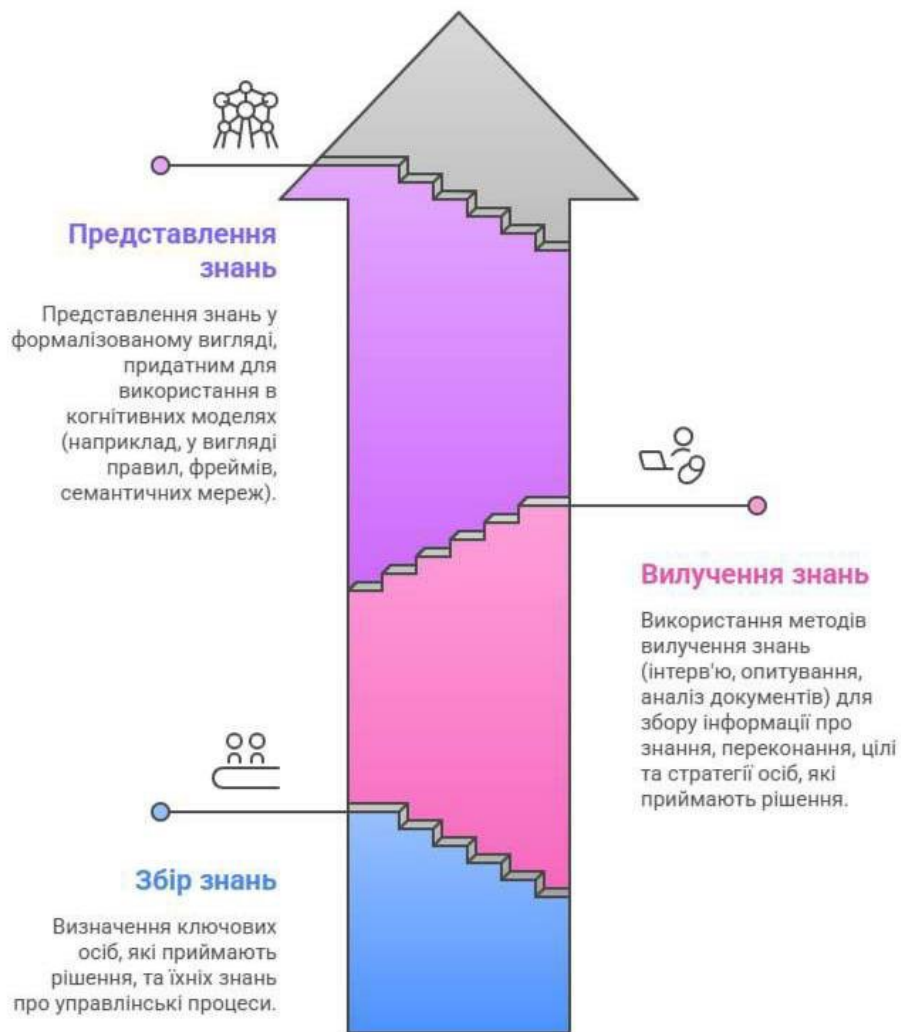


Рис. 5.15. Концептуальна схема когнітивно-алгоритмічного підходу до оптимізації управлінських процесів (розроблено автором на основі [301])

Особливе значення має здатність когнітивно-алгоритмічної системи до прогнозування — передбачення майбутніх станів процесів управління на основі аналізу попередніх сценаріїв. Створює можливість реагувати на зміни, упереджувати їх, перерозподіляючи ресурси, змінюючи стратегії або структури комунікацій. Система поступово набуває властивостей «мислення», коли результат оптимізації формується як наслідок колективного навчання між алгоритмами, моделями й управлінськими агентами.

У практичному аспекті когнітивно-алгоритмічний підхід відкриває новий рівень ефективності управління складними інвестиційно-будівельними або виробничими системами. Завдяки інтеграції когнітивних принципів у цифрове середовище можливо створювати самоналаштовувані управлінські модулі, котрі здатні підтримувати стабільність навіть у турбулентних умовах ринку. Модель поєднує алгоритмічну точність з гнучкістю інтелектуальних рішень, забезпечуючи безперервну еволюцію системи — від

аналізу до дії, від дії до нового рівня знань, що є основою сучасного когнітивного управління [360].

Після досягнення певного порогу інтенсивності подальше навчання дає лише незначне підвищення ефективності — система виходить на рівень когнітивного насичення, де зміна параметрів стає мінімальною, що представлено на рисунку 5.16. Характер кривої демонструє наявність оптимального діапазону навчання, у якому адаптація відбувається найбільш ефективно [375].

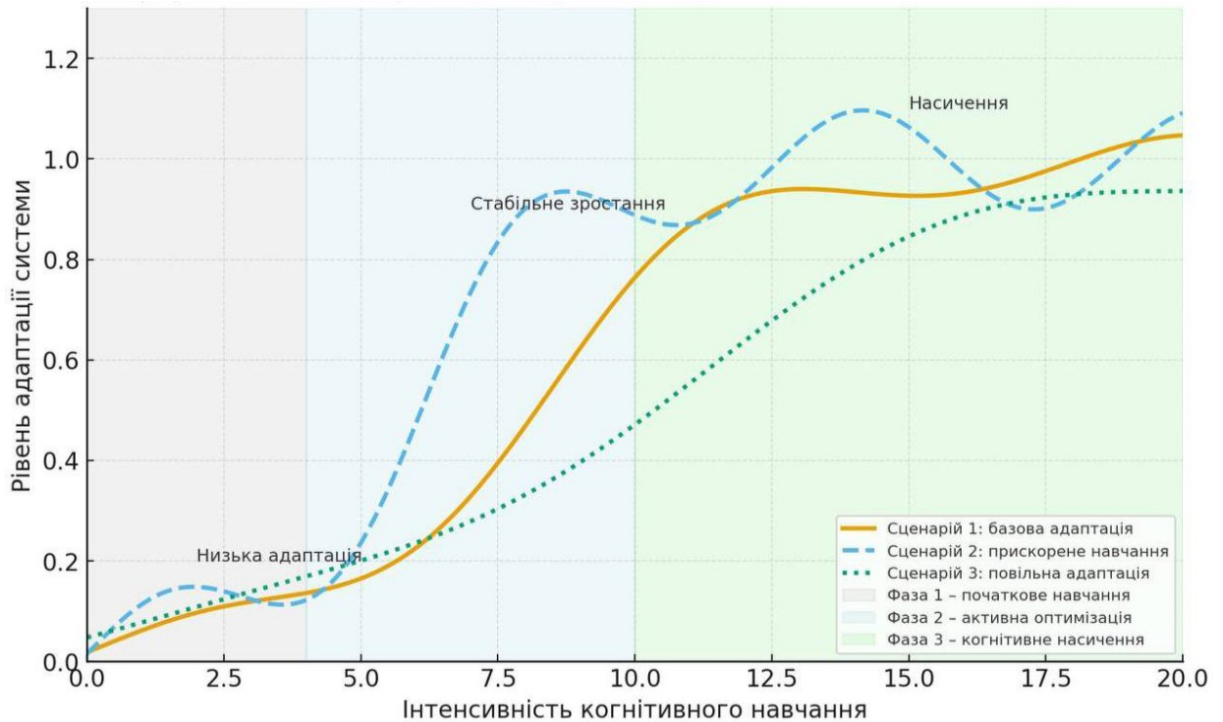


Рис. 5.16. Залежність рівня адаптації системи від інтенсивності когнітивного навчання (розроблено автором на основі [375])

Показник для аналізу графіка — еластичність адаптації за інтенсивністю навчання. Він показує, на скільки відсотків зросте рівень адаптації A за 1% збільшення інтенсивності когнітивного навчання L :

$$\eta(L) = \frac{dA}{dL} \cdot \frac{L}{A}, \quad (5.16)$$

$\eta > 1$ означає зону прискореного навчання (кожен +1% до інтенсивності дає понад +1% до адаптації), $\eta < 1$ — зону насичення.

Візьмемо типову логістичну криву адаптації:

$$A(L) = \frac{1}{1+e^{-k(L-L_0)}}, \quad \frac{dA}{dL} = kA(1-A), \quad (5.17)$$

де: $k = 0,6$ — “швидкість навчання”, $L_0 = 8$ — точка перелому. Оцінимо еластичність при $L=10$.

1. Обчислюємо $A(10)$: показник у степені $-0,6(10-8) = -1,2$; $e^{-1,2} \approx 0,3010$.

$$A = \frac{1}{1 + 0,3010} = \frac{1}{1,3010} \approx 0,7686.$$

2. Похідна: $\frac{dA}{dL} = 0,6 \cdot 0,7686 \cdot (1 - 0,7686)$

$$1 - 0,7686 = 0,2314; \text{добуток } 0,7686 \times 0,2314 \approx 0,177854;$$

$$\text{помноживши на } 0,6, \text{ маємо } \frac{dA}{dL} \approx 0,1067.$$

3. Еластичність:

$$\eta = 0,1067 \cdot \frac{10}{0,7686} \approx 0,1067 \cdot 13,01 \approx 1,39.$$

У точці $L=10$ система перебуває у фазі прискореного навчання: +1% до інтенсивності дає близько +1,39% до рівня адаптації. Той діапазон, де збільшення частоти ітерацій/якісності даних найбільш виправдане, перш ніж система увійде в режим когнітивного насичення.

Модель ілюструє послідовність логічних блоків — від початкового сприйняття даних і семантичної інтерпретації до етапів самооцінки ефективності та корекції алгоритмів. Завдяки наявності зворотного зв'язку система здатна самостійно виявляти помилки, оновлювати свої параметри та змінювати вагові коефіцієнти залежно від контексту середовища. У результаті оптимізація перетворюється на динамічний когнітивний процес, де управлінські рішення стають продуктом безперервного навчання та саморегуляції.

Моделювання управлінських процесів на основі когнітивних карт є одним із ключових інструментів сучасного аналітичного мислення в системах оптимізації. На відміну від класичних структурних діаграм, когнітивна карта не лише описує елементи системи, відображає характер, силу та напрям взаємозв'язків між ними. У межах такої моделі кожна дія, параметр або стан подається у вигляді вершини графа, а зв'язки між ними — у вигляді дуг із певною вагою, що визначає вплив однієї змінної на іншу. Дозволяє не просто візуалізувати структуру управління, а створити інструмент симуляції, здатний передбачати реакцію системи на зміну будь-якого її елемента.

У когнітивному середовищі карта виконує роль «ментальної моделі» системи — вона накопичує знання про логіку управління, взаємозалежності показників, і навіть про поведінку агентів у межах складних організаційних структур. Карта здатна еволюціонувати, оскільки після кожного управлінського циклу її параметри оновлюються на основі нових даних, створюючи динамічний інтелектуальний простір (рис. 5.17). Інформаційні потоки при цьому не лише передають значення параметрів, а й збагачуються контекстом: кожен сигнал у системі має кількісну та семантичну вагу. Дозволяє системі «розуміти» ситуацію, а не просто фіксувати зміни.

Ключовим елементом підходу виступає поняття когнітивної ентропії, котре слугує мірою балансу між стабільністю та здатністю системи до навчання. Якщо ентропія надто висока — система стає хаотичною, втрачає керованість і передбачуваність; якщо занадто низька — вона закостеніла, перестає реагувати на зміни середовища. Оптимальний рівень когнітивної ентропії відповідає стану динамічної рівноваги, коли структура управління достатньо стабільна для збереження ефективності, але водночас достатньо гнучка для адаптації до нових викликів [336].

Динаміка когнітивної ентропії у процесі навчання відображає перехід системи від хаотичного стану початкової невизначеності до впорядкованої структури знань і стабільної логіки прийняття рішень. На початковому етапі ентропія має високі значення, система формує зв'язки між параметрами, накопичує інформацію та оцінює її надійність. У цей період когнітивна структура є гнучкою, але нестійкою — будь-яка зміна вхідних даних суттєво впливає на результати.

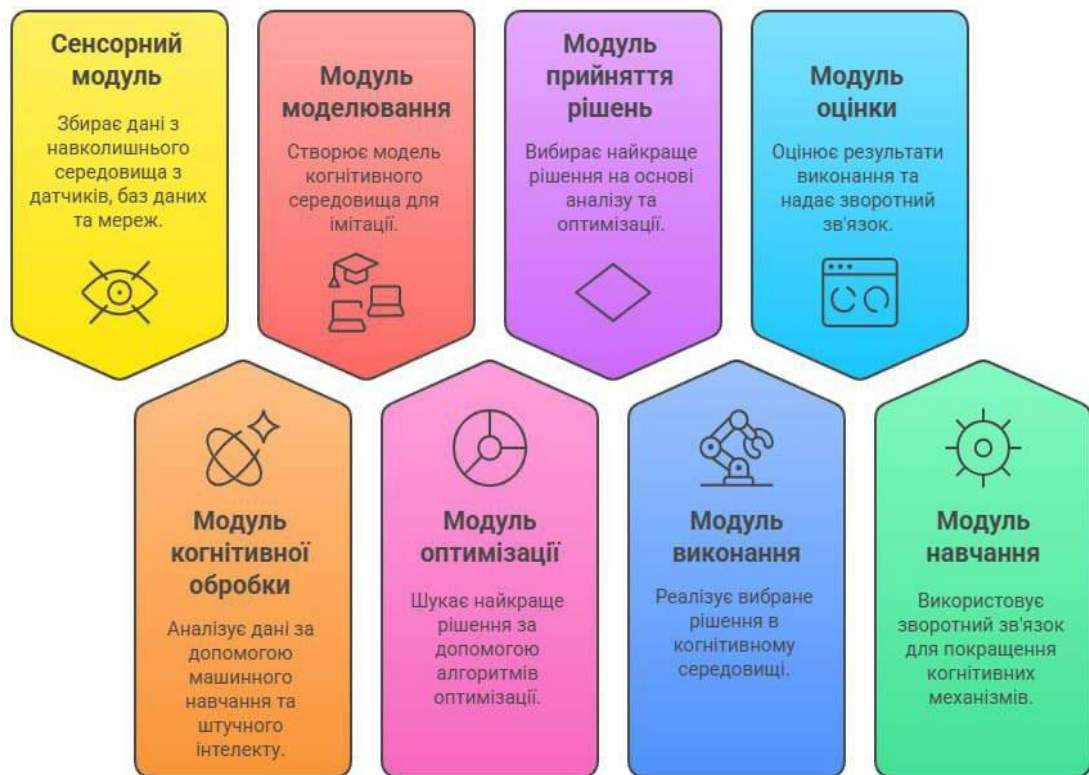


Рис. 5.17. Логічна архітектура алгоритмічного циклу оптимізації у когнітивному середовищі (розроблено автором на основі [337])

У процесі навчання алгоритм починає розпізнавати закономірності, і частина зв'язків стабілізується, знижуючи рівень ентропії. Відбувається перехід від випадкової реакції до свідомого прогнозування, коли система вже реагує на зміни, а формує внутрішню модель причинно-наслідкових залежностей. Поступове зменшення ентропії свідчить про розвиток когнітивної зрілості системи — узгодження її внутрішніх процесів і підвищення передбачуваності поведінки [355].

На фінальній стадії крива ентропії наближається до мінімального значення, що означає досягнення рівноваги між структурованістю знань і здатністю системи до подальшого навчання. У цій точці система працює найбільш ефективно: вона зберігає стабільність, але не втрачає адаптивності до нових умов (рис. 5.18).

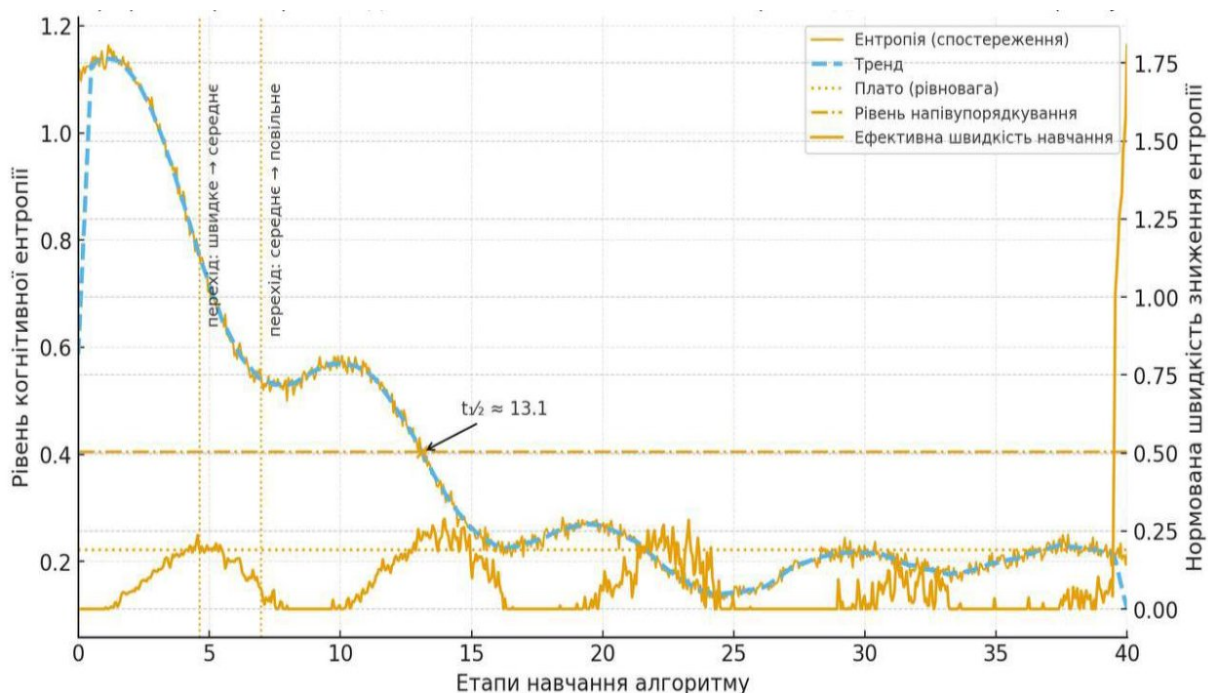


Рис. 5.18. Динаміка зниження когнітивної ентропії під час навчання алгоритму
(розроблено автором на основі [355])

Особливе значення має здатність когнітивно-алгоритмічної системи до прогнозування — передбачення майбутніх станів процесів управління на основі аналізу попередніх сценаріїв. Створює можливість реагувати на зміни, упереджувати їх, перерозподіляючи ресурси, змінюючи стратегії або структури комунікацій. Система поступово набуває властивостей «мислення», коли результат оптимізації формується як наслідок колективного навчання між алгоритмами, моделями й управлінськими агентами.

У практичному аспекті когнітивно-алгоритмічний підхід відкриває новий рівень ефективності управління складними інвестиційно-будівельними або виробничими системами. Завдяки інтеграції когнітивних принципів у цифрове середовище можливо створювати самоналаштовувані управлінські модулі, котрі здатні підтримувати стабільність навіть у турбулентних умовах ринку. Модель поєднує алгоритмічну точність з гнучкістю інтелектуальних рішень, забезпечуючи безперервну еволюцію системи — від аналізу до дії, від дії до нового рівня знань, що є основою сучасного когнітивного управління [376].

Після досягнення певного порогу інтенсивності подальше навчання дає лише незначне підвищення ефективності — система виходить на рівень когнітивного насичення, де зміна параметрів стає мінімальною. Характер кривої демонструє наявність оптимального діапазону навчання, у якому адаптація відбувається найбільш ефективно.

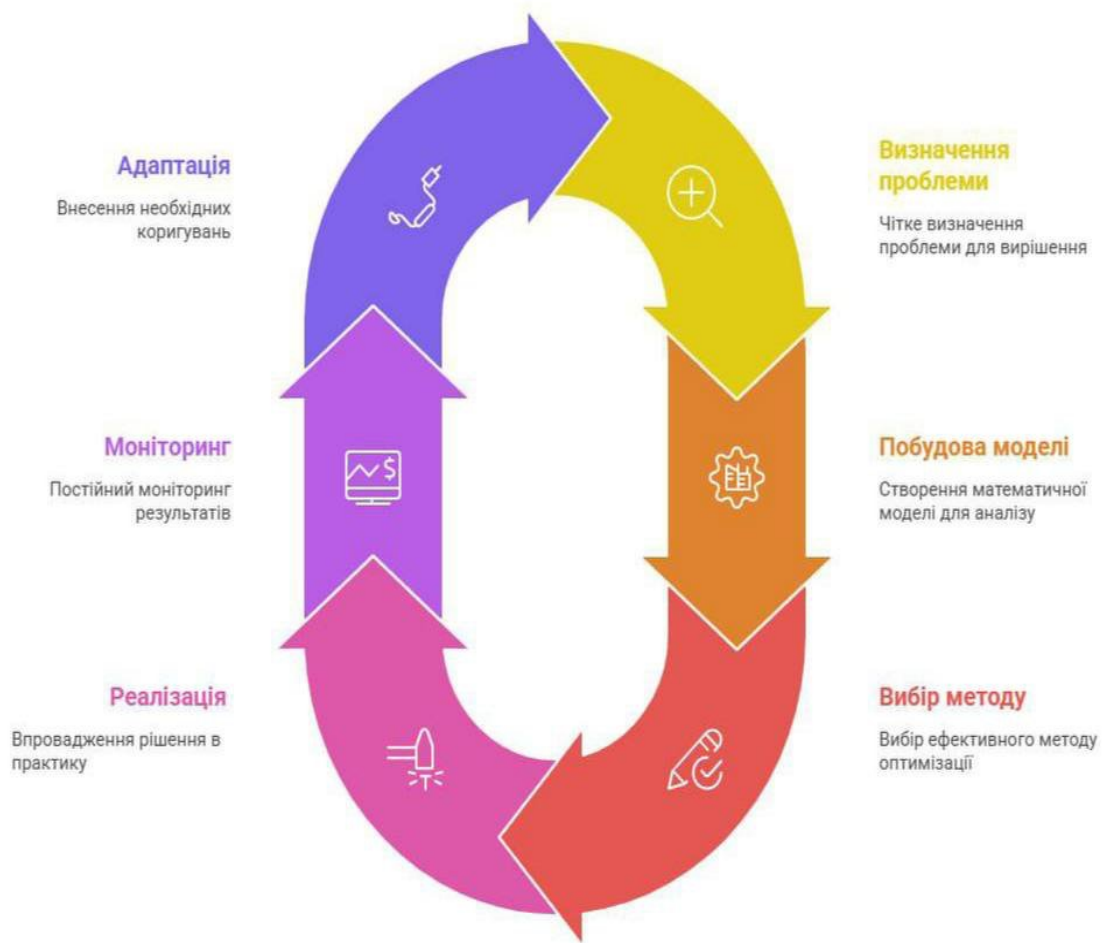


Рис. 5.19. Узагальнена когнітивна карта оптимізаційного процесу
(розроблено автором на основі [356])

Аналіз сучасних підходів до оптимізації управлінських процесів дозволяє виокремити чотири ключові групи алгоритмічних методів — детерміністичні, евристичні, стохастичні та когнітивно-адаптивні, кожна з яких має власну логіку побудови та область ефективного застосування. Детерміністичні методи є класичним базисом теорії оптимізації. Вони спираються на точні математичні моделі, мають однозначно визначені умови, функції цілі та обмеження. Їхня перевага полягає у високій точності й формальній строгості, однак головним недоліком є слабка стійкість до невизначеності та неповноти даних. У реальному управлінському середовищі, де параметри змінюються динамічно, методи втрачають ефективність, адже будь-яке відхилення від вихідних умов призводить до збоїв у результатах.

Евристичні підходи стали еволюційним розвитком детерміністичних, оскільки вони ґрунтуються на строгих аналітичних правилах, на інтуїтивних або емпіричних стратегіях пошуку рішення. Вони здатні швидко знаходити задовільні, хоча й не завжди оптимальні рішення, що особливо важливо у складних проєктних системах із великою кількістю взаємопов'язаних факторів. Евристичні алгоритми імітують мислення людини,

але їхня адаптивність є обмеженою: після зміни умов вони не здатні самостійно переосмислити свою логіку або навчитися на попередніх помилках.

Стохастичні методи значно підвищують рівень гнучкості, у процес пошуку оптимуму вони вводять випадковість, що дозволяє виходити з локальних мінімумів і досліджувати простір рішень ширше. Їх використання є ефективним у задачах, де існують непередбачувані впливи або численні взаємозалежності між змінними. Водночас надмірна стохастичність може призводити до нестабільності рішень — алгоритм потребує ретельного налаштування параметрів, щоб уникнути коливань або надто повільної збіжності. У проєктних системах цей підхід особливо цінний на етапах моделювання ризиків і сценарного прогнозування, коли важливо оцінити не одне, а кілька можливих рішень.

Найвищим рівнем еволюції виступають когнітивно-адаптивні методи, котрі поєднують у собі елементи попередніх підходів, але розширюють їх завдяки здатності до самонавчання, самокорекції та формування нових зв'язків між параметрами. Алгоритми не обмежуються фіксованою математичною структурою — вони використовують інформацію, що надходить у реальному часі, для оновлення власної логіки. У цьому контексті система виступає як інтелектуальний агент, що постійно оцінює свої рішення, аналізує наслідки та перебудовує поведінку відповідно до отриманого досвіду.

У складних інвестиційно-будівельних або виробничих середовищах когнітивно-адаптивні алгоритми демонструють перевагу завдяки своїй здатності функціонувати в умовах неповної інформації, невизначеності та постійних змін. Вони шукають оптимальне рішення, а й формують контекст його досягнення — аналізують, чому саме певний варіант є ефективним і як змінюється результат під впливом зовнішніх факторів. Системи набувають властивостей рефлексії — здатності осмислювати власні дії, що є ключовою ознакою когнітивного управління [305].

Детерміністичні й евристичні методи можна розглядати як базові інструменти математичної оптимізації, тоді як стохастичні й когнітивно-адаптивні — як її інтелектуальне продовження. Порівняльний аналіз показує, що саме когнітивні алгоритми мають найбільший потенціал у системах із багаторівневою структурою управління, де швидкість адаптації та гнучкість прийняття рішень визначають загальну ефективність процесу. Вони здатні реагувати на зміни, передбачати їх, створюючи динамічну модель взаємодії між інформацією, рішенням і досвідом, що є основою сучасних когнітивних екосистем управління.

Порівняльна характеристика, представлена в таблиці 5.3, дозволяє виявити, що традиційні алгоритми, попри свою математичну строгість, не забезпечують достатньої адаптивності у складних динамічних середовищах, тоді як когнітивно-адаптивні підходи демонструють вищий рівень інтелектуальної стійкості та здатності до самоорганізації.

Графічне порівняння (рис. 5.20) демонструє, що когнітивно-адаптивні алгоритми перевершують класичні методи за точністю кінцевого результату та за динамікою збіжності, забезпечуючи швидше досягнення оптимуму у складних, нелінійних середовищах.

Таблиця 5.3.

Порівняльна характеристика алгоритмів оптимізації в управлінських системах
(розроблено автором на основі [305])

Критерій оцінки	Детерміністичні алгоритми	Евристичні алгоритми	Стохастичні алгоритми	Когнітивно-адаптивні алгоритми
<i>Аналітична точність</i>	Висока за фіксованих умов	Середня, залежить від евристики	Варіативна, потребує калібрування	Висока, з урахуванням контексту
<i>Швидкість збіжності</i>	Висока при простій структурі	Помірна, залежить від налаштувань	Середня або низька на складних задачах	Висока завдяки динамічному навчанню
<i>Гнучкість до змін середовища</i>	Низька	Середня	Висока	Дуже висока, із когнітивною адаптацією
<i>Стійкість до шум та невизначеності</i>	Низька	Помірна	Висока	Дуже висока
<i>Здатність до само-навчання</i>	Відсутня	Обмежена	Часткова (через випадковість)	Повна, через когнітивне моделювання
<i>Придатність для великих динамічних систем</i>	Низька	Обмежена	Помірна	Висока
<i>Тип управлінських задач</i>	Формалізовані, детерміновані	Слабко структуровані	Стохастичні, ризикові	Інтелектуально-адаптивні, стратегічні
<i>Основна перевага</i>	Точність і формалізм	Простота реалізації	Глобальний пошук оптимуму	Самонавчання, передбачуваність, адаптивність
<i>Основне обмеження</i>	Нестійкість до змін	Евристична неточність	Потреба у великій кількості	Висока складність моделювання та обчислень

Випадковість і адаптивність є двома фундаментальними складовими когнітивної оптимізації, що перетворюють алгоритм із пасивного обчислювального інструмента на активну, самонавчальну систему. Випадковість у цьому контексті виступає як джерело інновацій — механізм, котрий дозволяє системі вийти за межі передбачуваних траєкторій пошуку та знайти нетривіальні рішення [325]. В умовах складних управлінських систем, де можливий вплив численних зовнішніх факторів, стохастичні процеси дають змогу

моделювати поведінку реальних агентів, у яких рішення приймаються через ймовірнісну взаємодію, колективне навчання та динамічну самоорганізацію.

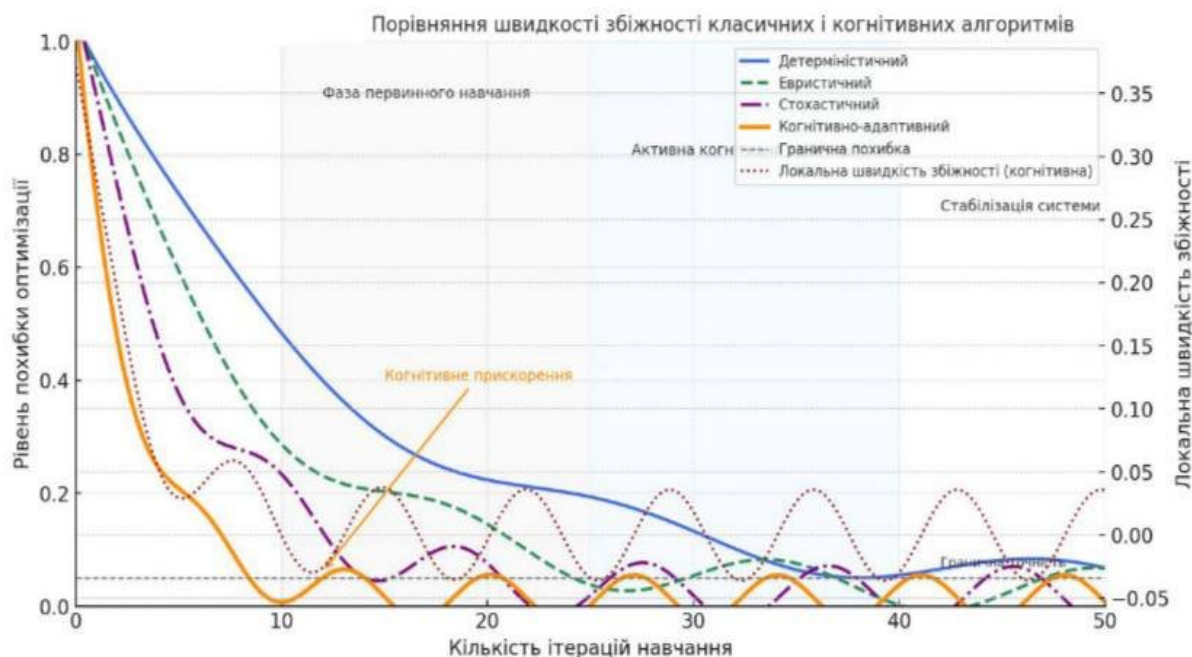


Рис. 5.20. Порівняння швидкості збіжності класичних і когнітивних алгоритмів
(розроблено автором на основі [325])

Одним із найефективніших інструментів стохастичної оптимізації є генетичні алгоритми, котрі відтворюють принципи природного відбору в інформаційному середовищі. Вони функціонують на основі еволюційного циклу — генерації, відбору, схрещування й мутації. Кожен потенційний варіант рішення розглядається як “особина” у популяції, що змагається за виживання, тобто за максимізацію цільової функції. З часом популяція еволюціонує, і найуспішніші рішення передають свої характеристики далі, утворюючи все кращі комбінації. Завдяки цьому процесу система здатна самостійно віднаходити оптимум навіть у надзвичайно складних просторах рішень, де аналітичне обчислення неможливе.

Іншим стохастичним підходом, що відображає колективну поведінку природних систем, є алгоритм рою часток (PSO). Його суть полягає у тому, що кожна “частка” — аналітичний агент — рухається у просторі рішень, враховуючи власний досвід та досвід сусідів. Підхід відображає механізм соціального навчання, коли система колективно коригує напрям пошуку, узгоджуючи локальні та глобальні знання. У контексті когнітивної оптимізації означає, що управлінська модель може навчатися на основі багатьох паралельних сценаріїв, поступово наближаючись до стану узгодженого рішення.

Не менш важливим є алгоритм мурашиних систем (ACO), у якому стохастичний вибір дій і накопичення досвіду реалізуються через метафору феромонних слідів. Кожен агент-мураха залишає у середовищі “сліди” своєї діяльності, а інші агенти орієнтуються на них, підсилюючи найуспішніші маршрути. У результаті з часом формується оптимальна траєкторія, що відповідає найменшим витратам або найвищій ефективності. У когнітивному контексті означає формування колективної пам’яті системи, у якій досвід попередніх рішень впливає на подальші управлінські дії, створюючи ефект накопиченого знання.

Стохастичні алгоритми, на відміну від жорстко детермінованих моделей, здатні працювати в середовищах, де неможливо наперед визначити всі змінні. Їхня сила полягає у використанні випадковості як інструмента дослідження нових стратегій, що уможлиблює відкриття альтернативних шляхів досягнення цілей. У процесі когнітивної оптимізації випадковість виконує роль “еволюційного шуму”, котрий не руйнує систему, а навпаки — підтримує її гнучкість, дозволяючи уникнути застиглих структур і зберегти здатність до розвитку [291].

Еволюційна модель рою є одним із найнаочніших прикладів когнітивної самоорганізації, відображає колективну динаміку управлінських агентів у процесі прийняття рішень. В її основі лежить принцип узгодження поведінки багатьох індивідуальних елементів системи — кожен агент діє автономно, водночас враховує інформацію про стан інших, формуючи спільну траєкторію руху до оптимального рішення. Модель відтворює механізми природного рою — зграй птахів, риб чи комах, де відсутній централізований контроль, існує високий рівень організованості, що виникає з локальних взаємодій.

Рисунок відображає архітектуру цієї моделі: кожен агент представлений як окрема точка з вектором дії, а сукупність зв'язків між ними формує просторову мережу, де траєкторії зближуються у напрямку до центру когнітивної гравітації — узгодженого рішення. Структура, представлена на рисунку 5.21, демонструє, як із хаотичної взаємодії виникає впорядкована поведінка системи, здатна самостійно розв'язувати складні управлінські задачі без зовнішнього керування.



Рис. 5.21. Еволюційна модель рою як приклад самоорганізації управлінських агентів
(розроблено автором на основі [364])

Показник для ройових/агентних систем — індекс когнітивної згоди (КЗ), вимірює ступінь узгодженості дій агентів у просторі рішень.

$$K3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i, \quad (5.18)$$

Значення $K3 \in [0;1]$: 0 — повна дезорієнтація, 1 — повна когерентність (усі агенти вирівняні). Стан до навчання. $N = 4$; Одиничні вектори: $(1,0), (1,0), (1,0), (-1,0)$. Сума: $(2,0)$; норма $= 2 \cdot K3_0 = 2/4 = 0,50$ — часткова узгодженість. Стан після когнітивного узгодження. Одиничні вектори (округлено): Сума по x : $1 + 0,9962 + 0,9848 + 0,9659 = 3,9469$

Сума по y : $0 + 0,0872 + 0,1736 + 0,2588 = 0,5196$.

$$\text{Норма суми: } \sqrt{3,9469^2 + 0,5196^2} \approx \sqrt{15,583 + 0,270} \approx \sqrt{15,853} \approx 3,983.$$

$$K3_1 = 3,983/4 \approx 0,996$$

Інтеграція когнітивно-алгоритмічних методів у структуру BIM/IPD системи відкриває новий рівень керування життєвим циклом будівельного проєкту, де процеси планування, прогнозування й контролю набувають властивостей самонавчання та адаптації. Традиційні моделі управління, побудовані на послідовному обміні даними, не здатні адекватно реагувати на швидкі зміни зовнішніх умов, тоді як когнітивно-алгоритмічна інтеграція перетворює BIM/IPD на інтелектуальну платформу з децентралізованою аналітикою. У архітектурі кожен аналітичний модуль функціонує як самостійний агент, що обробляє інформацію, формує прогнозні сценарії, порівнює результати з іншими вузлами та коригує власні параметри в режимі реального часу.

Ключова особливість такої системи полягає в тому, що аналітичні модулі — прогнозний, ризиковий, витратний, часовий, конструктивний — об'єднані допомогою мережових протоколів взаємного обміну. Забезпечує децентралізовану логіку прийняття рішень, коли зміна одного параметра (наприклад, вартості або терміну) автоматично оновлює відповідні показники в інших модулях. Завдяки цьому система стає самоузгодженою, а її поведінка — гнучкою: вона не очікує команд зверху, а самостійно вибудовує оптимальний баланс між якістю, строками та витратами.

Графік демонструє, що зі зростанням рівня когнітивної інтеграції відбувається стійке зменшення похибки прогнозування, причому найбільший ефект спостерігається при переході від фрагментованої структури до повністю зв'язаної мережі аналітичних вузлів. Підтверджує, що когнітивна синхронізація між модулями є ключовим чинником підвищення точності прогнозів у сучасних інтелектуальних системах управління проєктами [351].

Метрика для інтегрованих BIM/IPD-систем — коефіцієнт синхронізованої достовірності K_{SD} , котрий агрегує точність прогнозу P та рівень когнітивної синхронізації модулів S в один показник. Визначимо його як зважену гармонійну середню, що карає дисбаланс між P і S :

$$K_{SD} = \frac{1+w}{\frac{1}{P} + \frac{w}{S}}, \quad (5.19)$$

де: $w > 0$ — вага важливості синхронізації відносно прогнозної точності. Чим вищий $K_{SD} \in (0,1]$, тим краще узгоджена й надійна система. Нехай для проекту отримано $P = 0,93$ (середня точність прогнозу за горизонтом планування), $S = 0,85$ (індекс когнітивної синхронізації модулів), вагу беремо $w = 0,5$ — синхронізація важлива, але трохи поступається точності (рис. 5.22).

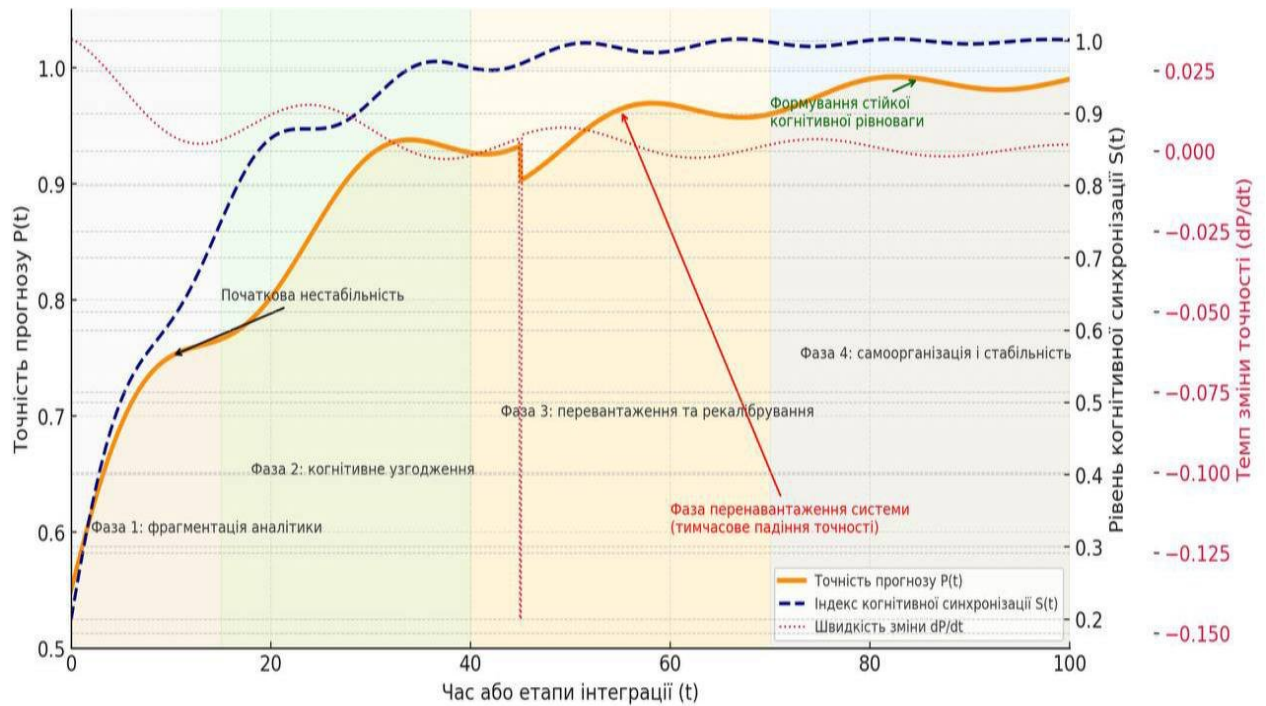


Рис. 5.22. Залежність точності прогнозу від рівня інтеграції когнітивних модулів (розроблено автором на основі [351])

Обчислимо знаменник:

$$\frac{1}{P} + \frac{w}{S} = \frac{1}{0,93} + \frac{0,5}{0,85} \approx 1,07527 + 0,58824 = 1,66351.$$

$$\text{Чисельник } 1 + w = 1,5. \text{ Тоді } K_{SD} = \frac{1,5}{1,66351} = 0,90165 \quad K_{SD} = 0,902$$

На рисунку представлено узагальнену модель, де когнітивні модулі (прогнозування, ризики, вартість, графік, ефективність) з'єднані між собою двосторонніми інформаційними каналами та взаємодіють через адаптивний алгоритмічний рівень. Рівень відповідає за навчання системи, оновлення вагових коефіцієнтів зв'язків і координацію інформаційних потоків у реальному часі [135]. Архітектура демонструє, як BIM/IPD трансформується з інструменту управління даними у когнітивно-аналітичну систему, здатну до самонавчання, прогнозування та самокорекції в процесі реалізації проекту (рис. 5.23).



Рис. 5.23. Архітектура когнітивно-алгоритмічної взаємодії у BIM/IPD системі
(розроблено автором на основі [135])

Формулу, котра описує індекс когнітивної ефективності управлінської системи — показник, що відображає збалансованість між точністю рішень, адаптивністю алгоритмів і швидкістю їх реалізації. Формула когнітивної ефективності системи:

$$K_{CE} = \frac{P^{\alpha} \times A^{\beta}}{T^{\gamma}}, \quad (5.20)$$

де: P — середня точність прогнозу (0–1); A — адаптивність системи, тобто здатність оновлювати моделі після змін середовища (0–1); T — середній час ухвалення управлінського рішення (умовні одиниці); $\alpha = 0,6, \beta = 0,3, \gamma = 0,5$.

Інтерпретація:

Чим вищий K_{CE} , тим ефективніше система поєднує точність, адаптивність і швидкодію.

Для когнітивно-алгоритмічної системи управління будівельним проектом маємо: $P = 0,92$, $A = 0,88$, $T = 1,6$. Коефіцієнти ваг: $\alpha = 0,6$, $\beta = 0,3$, $\gamma = 0,5$. Підставимо у формулу:

$$K_{CE} = \frac{(0,92)^{0,6} \cdot (0,88)^{0,3}}{(1,6)^{0,5}}.$$

Обчислимо поетапно:

$$(0,92)^{0,6} = 0,950, \quad (0,88)^{0,3} = 0,958, \quad (1,6)^{0,5} = 1,265.$$

Далі:

$$K_{CE} = \frac{0,950 \cdot 0,958}{1,265} = \frac{0,910}{1,265} = 0,719.$$

Рисунок 5.24 відображає взаємозв'язки між рівнями архітектури: інформаційні потоки спрямовані вертикально (знизу вгору — дані, згори вниз — рішення), тоді як когнітивні зв'язки утворюють горизонтальну мережу між модулями. Їх перехресна взаємодія формує основу інтелектуального управління нового типу, де оптимізація є постійним процесом адаптації, узгодження та саморозвитку системи [244].

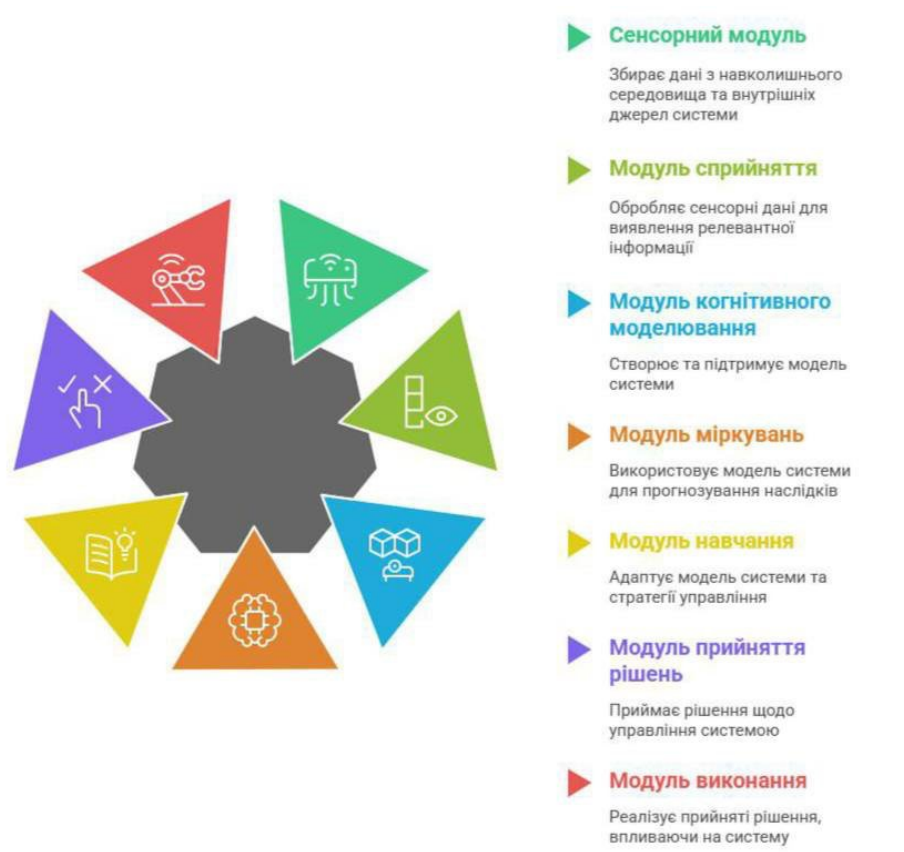


Рис. 5.24 Узагальнена когнітивна архітектура системи алгоритмічної оптимізації управління (розроблено автором на основі [244])

5.4. Використання методів кластеризації для виділення інтелектуальних спільнот у мережі учасників проєкту

Кластеризація розглядається як базовий інструмент аналізу складних графових структур, у яких взаємодія між елементами системи має мережеву природу та відображає багатовимірні залежності, що не можуть бути описані лінійними моделями. У контексті управління проєктами кластеризація дозволяє виявити приховані закономірності у поведінці учасників, визначити групи з високим рівнем внутрішньої взаємодії та сформувати підмножини агентів, які діють як цілісні інтелектуальні утворення. Спільноти характеризуються стабільністю комунікацій, узгодженістю рішень та здатністю до локального навчання, що робить їх ключовими компонентами когнітивно-орієнтованих моделей управління.

Актуальність кластеризації особливо зростає в середовищах BIM/IPD, де інформаційні потоки надзвичайно інтенсивні й охоплюють різноманітні типи даних — від інженерних моделей до фінансових показників, логістичних обмежень та оновлених планів робіт. У системах кожний учасник проєкту функціонує як вузол великої мережі, у якій сила та структура зв'язків визначають якість координації, швидкість прийняття рішень і ступінь адаптивності. Стандартизовані моделі організації даних, притаманні BIM, разом із контрактними механізмами IPD, створюють умови для формування стійких груп взаємодії, котрі природно виявляються засобами кластеризаційного аналізу. Дозволяє картувати реальну структуру комунікацій, оцінювати ступінь узгодженості між учасниками, прогнозувати конфліктні точки та оптимізувати інформаційні маршрути [343].

Теоретичне завдання даного підрозділу полягає у визначенні груп вузлів, котрі демонструють максимальну внутрішню когерентність зв'язків, тобто мають більшу кількість внутрішніх ребер порівняно з їх зовнішніми взаємодіями з іншими частинами мережі. Мета кластеризації у цьому випадку полягає не просто у механічному розбитті графа на підмножини, а у виявленні реальних інтелектуальних спільнот — об'єднань учасників, здатних до спільної оптимізації рішень, швидкої взаємної адаптації, колективного навчання й синхронного реагування на зміни проєктного середовища. Виявлення кластерів дозволяє побудувати модель управління, де комунікації стають структурованими, а розподіл відповідальностей і функцій — максимально логічним і наближеним до реального інформаційного балансу системи.

Концептуальна побудова інтелектуальних спільнот у мережі учасників проєкту ґрунтується на уявленні про систему як сукупність взаємопов'язаних вузлів, де сила та характер зв'язків визначають здатність груп до спільного навчання, координації та вироблення узгоджених рішень. Перехід від індивідуального рівня взаємодій до колективних утворень відбувається тоді, коли між окремими учасниками формується стійка інформаційна щільність, що перевищує середньомережевий поріг і сигналізує про виникнення потенційної спільноти. У межах BIM/IPD такі процеси проявляються особливо виразно, оскільки інформаційні потоки не лише інтенсивні, а й структуровані, що дає змогу спостерігати, як із множини взаємодіючих агентів виокремлюються підмережі зі специфічними функціями, ролями та сценаріями поведінки. Рисунок 5.25 подає узагальнену модель, котра відображає логіку самоорганізації кластерів — від окремих комунікацій до формування стійких інтелектуальних структур.

Кластеризація графів визначається як процес поділу множини вузлів на підгрупи, щоб внутрішні зв'язки всередині кожної групи були значно щільнішими або значущішими, ніж зв'язки з іншими частинами мережі. У графових структурах означає аналіз того, як інтенсивність взаємодій, вага ребер, їхня семантика або частота комунікацій формують природні межі між підмножинами елементів [316]. Підхід дає змогу виокремити логічно пов'язані сегменти системи, котрі функціонують як автономні або напівсамостійні блоки з підвищеним рівнем внутрішньої узгодженості. Кластеризація розглядає структурний аспект графа, динаміку взаємодій: наскільки часто вузли обмінюються даними, які функції виконують у загальній архітектурі та які інформаційно-аналітичні потоки формують у межах свого підкластеру. Робить її

ключовим механізмом пізнання складних мереж, зокрема — мереж управління у проєктній діяльності.

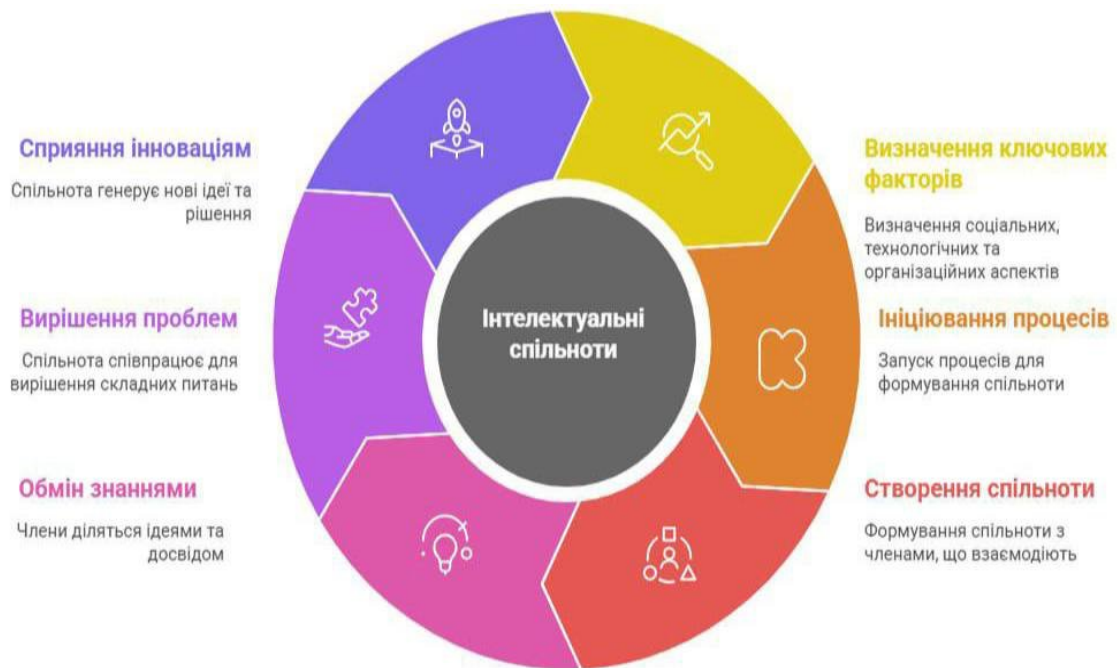


Рис. 5.25. Концептуальна модель утворення інтелектуальних спільнот у мережі проєкту
(розроблено автором на основі [316])

У науковій практиці виокремлюють три провідні групи методів кластеризації графів, котрі відрізняються тим, як вони формують підмножини вузлів і які критерії оптимальності використовують. Жадібні методи будуються на принципі локального вибору найкращого можливого рішення на кожному кроці: алгоритм шукає найвигіднішу для поточного стану операцію з'єднання або поділу, що забезпечує поступове зростання модульності чи іншого цільового критерію. Вони швидкі й масштабовані, не гарантують глобальної оптимальності, рішення приймаються без глибокого аналізу майбутніх наслідків. Методи переміщень працюють інакше: вони допускають перестановку, вихід і повторний вхід вузлів до різних кластерів, оцінюючи, як подібні зміни впливають на глобальний показник якості розбиття. Підхід є більш гнучким і дозволяє виходити з локальних мінімумів, система перевіряє альтернативні конфігурації структури графа, оновлюючи підмножини відповідно до їх внеску у внутрішню щільність зв'язків [352].

Теоретична оцінка якості розбиття мережі на інтелектуальні спільноти спирається на поняття модульності, котре кількісно вимірює, фактична структура кластерів відрізняється від випадкового розподілу зв'язків. Нижче подані підводки, формули та короткі ілюстративні розрахунки.

Після введення формального розбиття графа на спільноти доцільно використати узагальнений коефіцієнт модульності за Girvan–Newman, котрий порівнює реальну кількість внутрішніх зв'язків у кластерах з очікуваною при випадковому розподілі ребер. У найпростішому вигляді для неорієнтованого незваженого графа модульність можна записати так:

$$Q = \frac{|E_{in}| - |E_{in-R}|}{|E|}, \quad (5.21)$$

де: $|E|$ – загальна кількість ребер у графі, $|E_{in}|$ – кількість внутрішніх ребер, що належать кластерам у побудованому розбитті, $|E_{in-R}|$ – очікувана кількість внутрішніх ребер у тих самих кластерах за умови випадкового розподілу зв'язків при збереженні ступенів вершин. Якщо, наприклад, мережа має $|E| = 8$ ребер, для певного розбиття спостерігається $|E_{in}| = 5$, а модель випадкового графа дає очікуване значення $|E_{in-R}| = 3$, то модульність становитиме:

$$Q = \frac{5-3}{8} = \frac{2}{8} = 0,25.$$

Означає, що внутрішня зв'язність обраних спільнот на 25 % вища за ту, яку можна було б очікувати у разі випадкової організації зв'язків, отже таке розбиття вже має певний рівень структурованості.

Для зважених мереж, які є типовими для BIM/IPD середовища (де ребра характеризуються, наприклад, інтенсивністю комунікацій або обсягом спільних даних), модульність визначають з урахуванням ваг зв'язків і ступенів вершин. Стандартна формула для зваженого графа має вигляд:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left[A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j), \quad (5.22)$$

де: A_{ij} – вага ребра між вершинами i та j (за відсутності зв'язку $A_{ij} = 0$), $k_i = \sum_j A_{ij}$ – зважений ступінь вершини i , $m = \frac{1}{2} \sum_{i,j} A_{ij}$ – сумарна вага всіх ребер у мережі, $\delta(c_i, c_j)$ – індикатор, який дорівнює 1, якщо вершини i та j належать одному кластеру, і 0 в іншому разі. Щоб спростити приклад, можна перейти до агрегованої форми для однієї спільноти: нехай сумарна вага всіх зв'язків у графі $2m = 40$, сумарна вага внутрішніх зв'язків певного кластера дорівнює $w_{in} = 14$, а сума зважених ступенів усіх вершин цього кластера становить $k_C = 20$. Тоді вклад цієї спільноти у модульність можна подати як:

$$Q_C = \frac{w_{in}}{m} - \left(\frac{k_C}{2m} \right)^2 = \frac{14}{20} - \left(\frac{20}{40} \right)^2 = 0,70 - 0,25 = 0,45.$$

Отримане значення свідчить, що з урахуванням ваг зв'язків даний кластер істотно перевищує випадковий рівень внутрішньої зв'язності, тобто група вузлів дійсно формує інтелектуально узгоджену спільноту.

У процесі алгоритмічної оптимізації розбиття мережі на спільноти ключову роль відіграє не стільки саме значення модульності, скільки її приріст при локальних операціях над структурою кластерів. Для цього використовується вираз для зміни модульності ΔQ

при переміщенні окремого вузла з одного кластера до іншого. У рамках підходу типу Louvain така зміна може бути записана у вигляді:

$$\Delta Q = \left[\frac{\Sigma_{in} + k_{i,in}}{2m} - \left(\frac{\Sigma_{tot} + k_i}{2m} \right)^2 \right] - \left[\frac{\Sigma_{in}}{2m} - \left(\frac{\Sigma_{tot}}{2m} \right)^2 - \left(\frac{k_i}{2m} \right)^2 \right], \quad (5.23)$$

де: Σ_{in} – сумарна вага внутрішніх зв’язків кластера до переміщення вузла, Σ_{tot} – сумарна вага всіх зв’язків вершин цього кластера з рештою мережі (сума ступенів), k_i – зважений ступінь вузла i , який переміщується, $k_{i,in}$ – сумарна вага зв’язків вузла i з вершинами цільового кластера, m – як і раніше, половина сумарної ваги всіх ребер у графі. Нехай, для прикладу, $2m = 40$, тобто $m = 20$, для певного кластера до переміщення вузла маємо $\Sigma_{in} = 6$, $\Sigma_{tot} = 10$, вузол i має ступінь $k_i = 4$, а вага його зв’язків з цим кластером становить $k_{i,in} = 3$. Тоді після додавання вузла до кластера перший доданок у виразі для ΔQ дорівнює:

$$\frac{\Sigma_{in} + k_{i,in}}{2m} - \left(\frac{\Sigma_{tot} + k_i}{2m} \right)^2 = \frac{6 + 3}{40} - \left(\frac{10 + 4}{40} \right)^2 = \frac{9}{40} - \left(\frac{14}{40} \right)^2 = 0,225 - 0,1225 = 0,1025$$

а другий (початковий стан без вузла) дорівнює:

$$\frac{\Sigma_{in}}{2m} - \left(\frac{\Sigma_{tot}}{2m} \right)^2 - \left(\frac{k_i}{2m} \right)^2 = \frac{6}{40} - \left(\frac{10}{40} \right)^2 - \left(\frac{4}{40} \right)^2 = 0,15 - 0,0625 - 0,01 = 0,0775.$$

Приріст модульності становить: $\Delta Q = 0,1025 - 0,0775 = 0,025$.

Позитивне значення ΔQ означає, що перенесення вузла до нового кластера покращує якість розбиття, підвищуючи рівень внутрішньої когерентності спільноти. У практичних алгоритмах кластеризації такі локальні прирости послідовно акумулюються, ведучи систему до розбиття, яке максимально наближається до глобального максимуму модульності і, відповідно, до найбільш виразної структури інтелектуальних спільнот у мережі учасників проєкту [348].

Графік дозволяє візуалізувати процес утворення спільнот кількісно та концептуально: кластери спочатку хаотично формуються, далі проходять етапи стабілізації, після чого настає зона когнітивної консолідації, де модульність виходить на плато. Система досягає найбільш збалансованої структури, у якій внутрішня когерентність груп максимальна, а зовнішні зв’язки мають мінімальний вплив. Графік динаміки Q виступає важливим індикатором якості кластеризації та дозволяє оцінити, наскільки ефективно алгоритм виявляє інтелектуальні спільноти в мережі проєктного середовища.

Алгоритм послідовного вибору локально найкращих рішень у контексті кластеризації мережових структур будується на принципі жадібною евристики, коли на кожному кроці виконується вибір дії, котра забезпечує найбільше локальне покращення цільової функції. Підхід відображає логіку прийняття рішень, де система рухається шляхом найменшого опору, поступово будуючи структуру кластерів без необхідності повного перебору всіх можливих варіантів. У задачах виділення інтелектуальних спільнот метод дає змогу швидко зменшувати кількість зв’язків між різними підмножинами та

посилювати внутрішню концентрацію взаємодій. Локально оптимальний крок обирається на основі порівняння ваг зв'язків, щільності підструктур або показників модульності, що дає змогу вже на ранніх етапах досить точно визначати напрямок поділу мережі. Важливим аспектом є те, що алгоритм не гарантує глобального оптимуму, однак його продуктивність і простота роблять його одним із найуживаніших у великих графах, де повний аналіз всіх комбінаторних конфігурацій є неможливим.

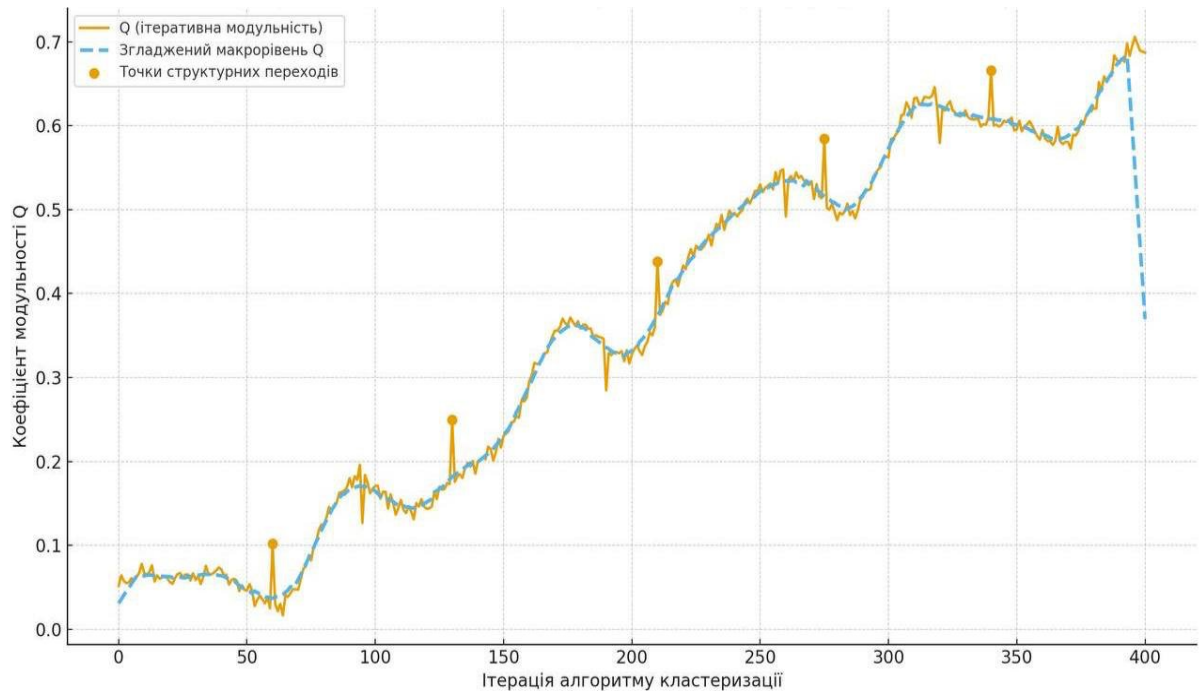


Рис. 5.26. Динаміка зміни коефіцієнта Q при формуванні кластерів
(розроблено автором на основі [348])

У межах мереж BIM/IPD логіка дає змогу виокремлювати групи учасників, між якими переважають інформаційні зв'язки, орієнтовані на обмін спеціалізованими знаннями або спільними технологічними процесами. Підхід добре узгоджується з природою проектних взаємодій, де найтісніші комунікації формуються навколо задач короткого горизонту планування, а мережа поступово самоорганізується відповідно до актуальних потреб будівельного циклу. Жадібна логіка дає змогу аналізувати мережу інкрементально, адаптуючись до змін структури потоку даних і дозволяючи швидко виявляти вузли, що відіграють роль комунікаційних точок напруженості [295].

Практичний приклад логіки демонструє алгоритм Дейкстри, котрий є класичною реалізацією жадібного підходу у задачах пошуку найкоротших шляхів. У контексті мережі учасників проекту алгоритм може бути використаний для мінімізації сумарної ваги зв'язків між певним ключовим вузлом та іншими елементами підмережі, що дозволяє визначити, котрі взаємодії з точки зору витрат інформації чи часу є найефективнішими. Для вузла А потрібно знайти найменш витратні маршрути передачі даних до інших вузлів: алгоритм на кожному кроці обирає ребро з мінімальною вагою, оновлює оцінки відстаней і розширює множину вже оптимізованих вузлів. Якщо початкова відстань від А до В становить 4, до С — 2, а до D — 7, то першим кроком алгоритм вибирає зв'язок А–С як

найлегший. Якщо через C існує шлях до D з вагами, що у сумі дають 5 замість початкових 7, відстань до D оновлюється до меншого значення. Послідовне оновлення дозволяє побудувати маршрут мінімальної сукупної вартості, а сукупність маршрутів відображає оптимізований «скелет» інформаційної архітектури мережі.

Наведений етап кластеризації вимагає формалізації того, як визначається локальне оточення кожного вузла в мережі, структури впливають на подальше переміщення елементів між кластерами та на приріст модульності. Для цього вводиться множина суміжних кластерів, котра описує всі спільноти, з якими даний вузол безпосередньо взаємодіє через свої ребра. Поняття є ключовим для алгоритмів на кшталт Louvain, переміщення вузла до будь-якого з таких кластерів потенційно може підвищити значення модульності графа. Формалізація дає змогу на кожному кроці ітерації точно обчислювати, котрі варіанти зміни належності є допустимими та найбільш перспективними з точки зору оптимізації.

Множина суміжних кластерів вузла i :

$$N_c(i) = C_k \exists j \in N(i) : l(j) = k \wedge l(j) \neq l(i), \quad (5.24)$$

де: $N_c(i)$ – множина кластерів, з якими вузол i має хоча б один зв'язок; $N(i)$ – множина сусідів вузла i у графі; $l(j)$ – мітка (номер) кластера, до якого належить вузол j ; C_k – кластер з номером k .

Приклад розрахунку:

Нехай маємо 5 вузлів: вузол 1 належить кластеру C_1 ; вузол 2 належить кластеру C_1 ; вузол 3 належить кластеру C_2 ; вузол 4 належить кластеру C_2 ; вузол 5 належить кластеру C_3 .

Зв'язки: вузол 1 з'єднаний з вузлами 2, 3, 5 $\rightarrow N(1) = (2,3,5)$; інші зв'язки зараз не потрібні, бо рахуємо лише для $i = 1$.

Тоді:

для $j = 2: l(2) = C_1$, але $l(2) = l(1)$, отже кластер не додаємо; для $j = 3: l(3) = C_2, l(3) \neq l(1), C_2 \in N_c(1)$; для $j = 5: l(5) = C_3, l(5) \neq l(1), C_3 \in N_c(1)$.

Множина суміжних кластерів для вузла 1: $N_c(1) = (C_2, C_3)$.

Вузол 1, будучи в кластері C_1 , має зв'язки з двома іншими кластерами – C_2 та C_3 .

У процесі аналізу мережових структур одним із базових підходів до формування інтелектуальних спільнот є метод агломеративного злиття, що поступово об'єднує вузли або малі групи вузлів у більші кластери згідно з принципом максимізації внутрішньої схожості зв'язків. Рисунок 5.27 дозволяє наочно відтворити, як із поодиноких елементів формується узгоджена структурна єдність, у якій спільноти виникають не як статично задані, а як результат послідовного укрупнення підграфів. Метод злиття забезпечує природну ієрархічність побудови кластерів, демонструючи весь шлях — від початкової множини окремих вузлів до інтегрованих структур, що мають чітко виражені спільні властивості та максимальну внутрішню щільність зв'язків. Представлена схема на рисунку узагальнює логіку агломеративного процесу й дозволяє простежити динаміку редукції мережі на кожному кроці [344].

Залежність збіжності жадібних алгоритмів від початкових ваг ребер є ключовим аспектом аналізу ефективності кластеризації, стартовий розподіл ваг визначає траєкторію локальних рішень та здатність алгоритму уникати деградації у локальних максимумах. Початкові ваги формують ту «ландшафтну» структуру, по якій алгоритм рухається, обираючи на кожному кроці найменш витратний або найсильніший зв'язок.

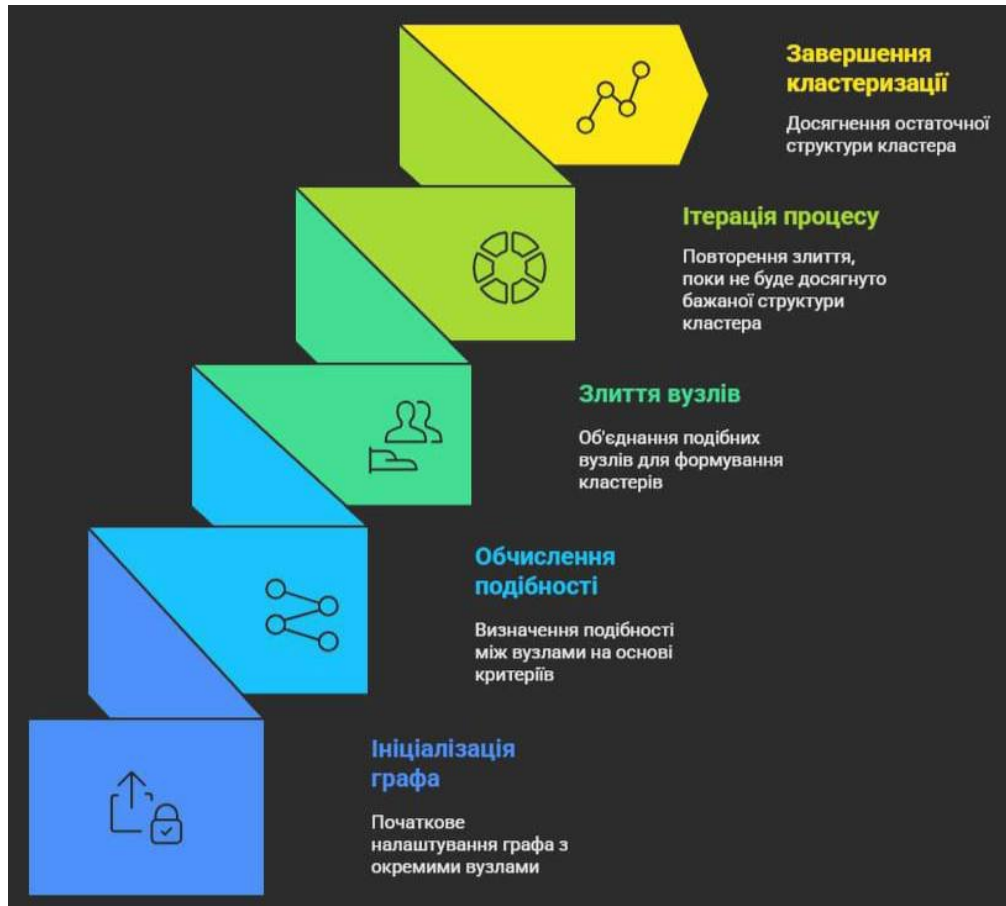


Рис. 5.27. Схема кластеризації графа методом злиття вузлів
(розроблено автором на основі [344])

Ітераційна модифікація кластерної структури розглядається як ключовий механізм поступового наближення мережевої системи до стану локального оптимуму, у межах якого жодне одиничне переміщення вузла не здатне покращити цільову функцію, як модульність або інші метрики когерентності спільнот. У процесах кластеризації графів та побудови інтелектуальних спільнот підхід забезпечує можливість багаторазового уточнення початкового розбиття, котре зазвичай є доволі грубим та не враховує прихованих структур зв'язків. Ітераційна модифікація ґрунтується на принципі локальних перетворень, де кожен крок передбачає оцінювання потенційності переміщення окремого вузла між суміжними кластерами, оцінку ефекту переміщення та прийняття рішення про його доцільність залежно від впливу на якість мережевої структури. За рахунок цього система формує статичний розподіл на спільноти, здійснює адаптивний перехід між конфігураціями, реагуючи на внутрішню топологію та інтенсивність зв'язків [297].

Представлений рисунок 5.28 відображає, як різні сценарії початкових ваг впливають на швидкість і стабільність збіжності жадібного алгоритму, демонструючи критичні точки, у яких зміна структури початкового ландшафту спричиняє суттєві відмінності у траєкторії оптимізації [317].

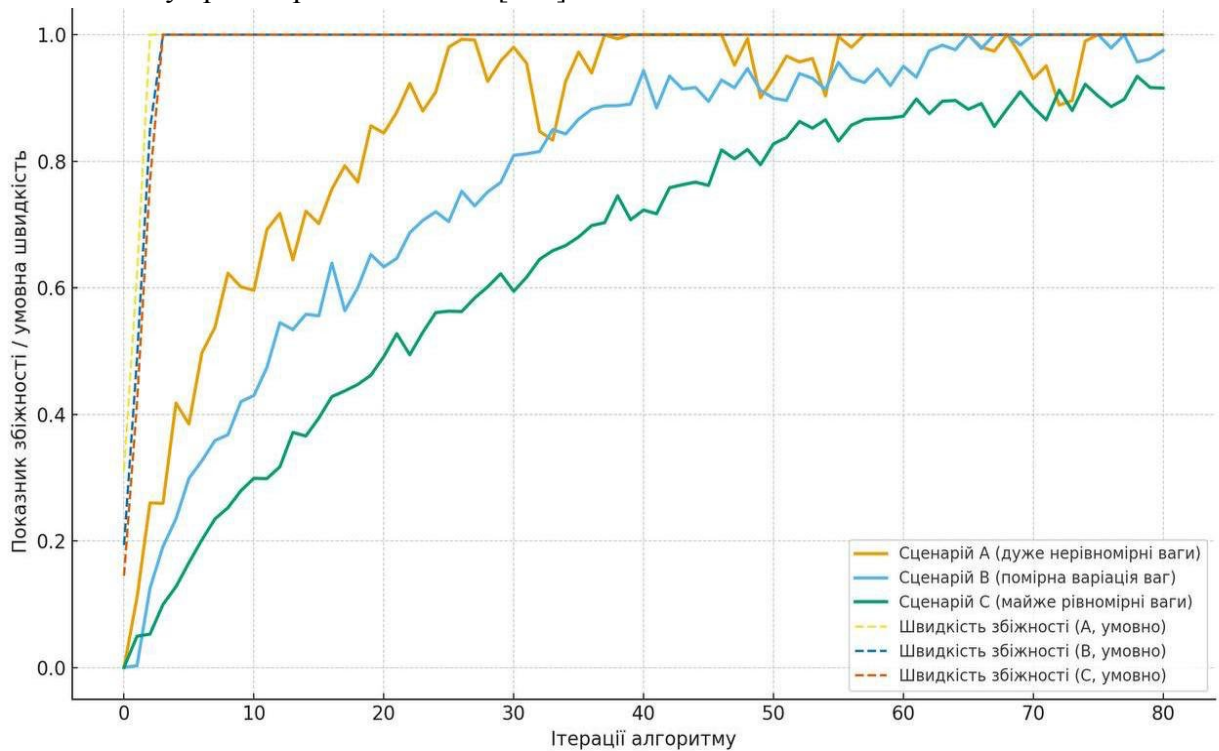


Рис. 5.28. Вплив початкових ваг на збіжність жадібного алгоритму
(розроблено автором на основі [317])

У процедурах ключовими є базові та стислі функції переміщення, котрі визначають спосіб опрацювання потенційних змін структури. Базові функції є локальними та орієнтованими на збереження певного набору сусідніх властивостей: вони оцінюють зміну ваги зв'язків вузла із внутрішніми та зовнішніми кластерами, враховують локальні ступені вузлів та структурну близькість компонентів. Функції переважно використовуються у випадках, коли важливо зберегти топологічні інваріанти або забезпечити стабільність метрики якості при малій кількості модифікацій. Стислі функції працюють на вищому рівні узагальнення і дозволяють об'єднувати серію локальних операцій у єдину мета-операцію, оцінюючи кінцевий результат замість кожного окремого проміжного кроку.

Для оцінювання якості розбиття графа на інтелектуальні спільноти використовується загальна формула модульності, котра дозволяє кількісно виміряти різницю між реальною інтенсивністю внутрішньокластерних зв'язків і тією, що могла б виникнути випадково при рівному розподілі ступенів між вузлами. Чим більше значення модульності, тим виразніше сформовані спільноти, а їх структура більш стабільна відносно випадкових флуктуацій мережевої топології. Формула застосовується для розбиття графа G на m кластерів і відображає сумарний внесок кожного кластера в загальну якість кластеризації.

Модульність розбиття графа G на m кластерів:

$$Q = \sum_{k=1}^m \left(\left(\sum_{i,j \in C_k} a_{ij} \right) / a_{\infty} - \left(\sum_{i \in C_k} a_i / a_{\infty} \right)^2 \right), \quad (5.25)$$

де: a_{ij} — вага ребра між вузлами i та j ; a_i — сума ваг ребер, інцидентних вузлу i ; $a_{\infty} = \sum_i \sum_j a_{ij}$ — сумарна вага всіх ребер графа; C_k — k -та спільнота (кластер).

Припустимо, що ми розбили граф на два кластери: C_1 та C_2 .

За результатами підрахунку отримали такі агреговані значення: сума внутрішніх ваг ребер: $\sum_{i,j \in C_1} a_{ij} = 6$; сума ступенів (усіх ваг ребер вузлів, що входять до C_1): $\sum_{i \in C_1} a_i = 8$.

для кластера C_2 : сума внутрішніх ваг ребер: $\sum_{i,j \in C_2} a_{ij} = 8$; сума ступенів вузлів: $\sum_{i \in C_2} a_i = 12$. сумарна вага всіх ребер графа: $a_{\infty} = 20$.
Тоді модульність:

$$Q = \left[(6/20) - (8/20)^2 \right] + \left[(8/20) - (12/20)^2 \right]$$

Для C_1 :

$$6/20 = 0.3$$

$$8/20 = 0.4, \text{ тоді } (8/20)^2 = 0.4^2 = 0.16$$

Внесок C_1 у модульність:

$$0.3 - 0.16 = 0.14.$$

Для C_2 :

$$8/20 = 0.4$$

$$12/20 = 0.6, \text{ тоді } (12/20)^2 = 0.6^2 = 0.36$$

Внесок C_2 :

$$0.4 - 0.36 = 0.04.$$

Складаємо внески обох кластерів:

$$Q = 0.14 + 0.04 = 0.18$$

Отримали $Q \approx 0.18$ — дане розбиття графа дає позитивну модульність, а структура спільнот краща за випадковий розподіл зв'язків.

Процес переміщення вузлів між кластерами є ключовим механізмом уточнення структури спільнот під час ітеративної кластеризації графів. На цьому етапі алгоритм аналізує потенційний виграш модульності, що може бути отриманий у разі переведення окремого вузла з поточного кластера до альтернативного. Рисунок 5.29 дозволяє наглядно продемонструвати зміну локальних структурних характеристик мережі, зокрема перерозподіл ваг внутрішньокластерних та міжкластерних зв'язків. Рисунок відображає, як крок за кроком система переходить від початкової, часто хаотичної конфігурації до більш впорядкованої та структурно стійкої топології, у якій кожен вузол займає позицію, що максимізує сумарну когерентність у межах сформованої спільноти.

Максимізація модульності є фундаментальним принципом побудови оптимального розбиття мережі на інтелектуальні спільноти, показник відображає баланс між реальною густиною зв'язків усередині кластерів та тією густиною, що могла б виникнути

випадково. Формування оптимального розбиття передбачає пошук такої конфігурації кластерів, у якій внутрішня щільність зв'язків суттєво перевищує очікувану, а міжкластерні ребра мінімізуються [349]. У складних мережах проєктного управління, де взаємодії між учасниками багатовимірні та нерівномірні, прямий перебір усіх можливих варіантів розбиття є неможливим, що обумовлює необхідність застосування спеціалізованих алгоритмів, здатних адаптивно ітеративно підсилювати структуру мережевої спільноти. З логіки випливає використання Louvain-алгоритму, котрий завдяки своїй ефективності та здатності працювати на великих графах став одним із найпоширеніших методів оптимізаційної кластеризації.



Рис. 5.29. Візуалізація процесу переміщення вузлів між кластерами
(розроблено автором на основі [349])

Його побудова ґрунтується на двоетапній логіці, що забезпечує поєднання локального поліпшення структури та ієрархічного укрупнення кластерів. На першому етапі кожен вузол розглядається окремо, і алгоритм послідовно перевіряє, чи призведе його переміщення до сусіднього кластера до підвищення модульності. Якщо переміщення демонструє позитивний результат, вузол змінює свою кластерну належність; процес триває, поки подальше покращення локальної модульності стає неможливим. Етап відтворює природну самоорганізацію структури, під час якої вузли шукають найбільш вигідне оточення з погляду кількості та ваги зв'язків [346].

Після завершення локальної оптимізації відбувається другий етап — агрегація. Сформовані на першому етапі кластери згортаються у нові мета-вузли, а ваги ребер між ними перераховуються на основі сумарних ваг зв'язків у початковому графі. Створює новий, компактніший граф вищого рівня абстракції, на якому процес локальної оптимізації запускається знову. Ітерація двох етапів забезпечує утворення ієрархії вкладених спільнот, де кожен новий рівень дає змогу поглибити структуру мережі та уточнити її модульність. Алгоритм завершується тоді, коли наступна ітерація не дає

жодного приросту в значенні модульності, що означає досягнення стабільного, близького до оптимального розбиття.

Louvain-алгоритм формує оптимальну структуру спільнот шляхом послідовного локального вдосконалення та структурування кластерів на вищих рівнях агрегації. Його ефективність полягає у здатності адаптуватися до нерівномірних структур графа, швидко знаходити квазіоптимальні рішення та виявляти природні спільноти у великих мережах проектного середовища, що робить його незамінним інструментом когнітивного аналізу та побудови інтелектуально орієнтованих систем управління.

Подальший розвиток математичної моделі кластеризації потребує переходу від скалярної форми модульності до матричного уявлення, котре дозволяє розглядати структуру мережі як систему взаємодій між вузлами у просторі зв'язностей. Матричний підхід забезпечує формальну базу для застосування спектральних методів, спрощує операції агрегації, дає змогу точно обчислювати зміну модульності при будь-якій локальній модифікації структури. Формули описують повний цикл: від побудови матриці модульності до оновлення ваг кластерних зв'язків після агломерації. Кожна формула супроводжується коротким числовим прикладом, що демонструє логіку її практичного застосування.

Матричне відображення модульності:

$$Q = (1/(2m)) * \sum_{i=1..n} \sum_{j=1..n} B_{ij} * \delta(c_i, c_j), \quad (5.26)$$

де: B_{ij} – елемент матриці модульності, m – половина сумарної ваги всіх ребер, $\delta(c_i, c_j) = 1$, якщо вузли i та j у одному кластері, і 0 – інакше.

Елементи стандартної матриці модульності:

$$B_{ij} = a_{ij} - (k_i \times k_j) / (2m), \text{ якщо } i \neq j \quad B_{ii} = - (k_i^2) / (2m), \text{ якщо } i = j, \quad (5.27)$$

де: a_{ij} – елемент матриці суміжності, k_i – ступінь (сума ваг зв'язків) вузла i , m – половина сумарної ваги всіх ребер.

Критерій модульності для m кластерів:

$$Q = \sum_{k=1..m} [(W_{in}(C_k) / (2m)) - (K(C_k) / (2m))^2], \quad (5.28)$$

де: $W_{in}(C_k)$ – сума ваг внутрішніх ребер кластера C_k , $K(C_k)$ – сума ступенів усіх вузлів кластера C_k , m – як вище.

Зміна модульності при переміщенні вузла між кластерами:

$$\Delta Q = [(W_{in} + k_{i,in}) / (2m) - ((K + k_i) / (2m))^2] - [W_{in} / (2m) - (K / (2m))^2 - (k_i / (2m))^2], \quad (5.29)$$

де: W_{in} – внутрішня вага кластера до переміщення вузла i , $k_{i,in}$ – сума ваг зв'язків вузла i з вузлами цільового кластера, K – сумарний ступінь вузлів кластера до переміщення, k_i – ступінь вузла i , m – половина сумарної ваги всіх ребер.

Скорочена форма для практичного обчислення ΔQ :

$$\Delta Q = (k_{i,in} / (2m)) - (k_i \times K) / (2m^2), \quad (5.30)$$

Форма зручна для швидких локальних обчислень. Внутрішня вага нового кластера (після злиття):

Нехай об'єднуємо кластери C_a та C_b в новий C_{ab} :

$$W_{in}(new) = W_{in}(C_a) + W_{in}(C_b) + W(C_a, C_b), \quad (5.31)$$

де: $W(C_a, C_b)$ – сума ваг ребер між кластерами C_a та C_b до злиття.

Міжкластерна вага нового мета-вузла з іншим кластером:

Для будь-якого третього кластера C_k : $W(C_{ab}, C_k) = W(C_a, C_k) + W(C_b, C_k)$.

Оновлення ступеня нового кластеру: $K(C_{ab}) = K(C_a) + K(C_b)$ Приклад розрахунку (злиття кластерів + оновлення параметрів):

Припустимо, маємо два кластери C_a і C_b , які зливаємо в C_{ab} . Нехай: $W_{in}(C_a) = 4$, $W_{in}(C_b) = 5$, $W(C_a, C_b) = 3$, $W(C_a, C_k) = 6$, $W(C_b, C_k) = 2$, $K(C_a) = 9$, $K(C_b) = 7$.

Внутрішня вага нового кластера: $W_{in}(new) = 4 + 5 + 3 = 12$. Вага зв'язків нового кластера C_{ab} з іншим кластером C_k : $W(C_{ab}, C_k) = 6 + 2 = 8$. Оновлений сумарний ступінь нового кластера: $K(C_{ab}) = 9 + 7 = 16$. Якщо, наприклад, половина сумарної ваги всіх ребер у графі $m = 20$, то вклад нового кластера C_{ab} у модульність можна приблизно оцінити через критерій модульності:

$$Q_{ab} \approx (W_{in}(new)/(2m)) - (K(C_{ab})/(2m))^2 = (12/40) - (16/40)^2 = 0.30 - 0.16 = 0.14$$

Після злиття кластера C_a та C_b новий кластер C_{ab} дає внесок у модульність приблизно $Q_{ab} \approx 0.14$. Якщо внесок більший, ніж сума попередніх внесків двох окремих кластерів, то злиття є вигідним з точки зору оптимізації структури спільнот. У процесі оптимізації кластерної структури мережі методом Louvain показник модульності змінюється поступово, відображаючи вплив локальних переміщень вузлів та подальшої агрегації на топологічну впорядкованість графа. На ранніх етапах алгоритм здебільшого зосереджується на локальних покращеннях, що зумовлює стрімке зростання модульності, алгоритм швидко усуває найбільш очевидні структурні невідповідності. Візуалізація залежності модульності від кількості ітерацій дозволяє простежити момент стабілізації процесу, коли подальші кроки Louvain-алгоритму вже не створюють помітного приросту, що свідчить про досягнення квазіоптимального розбиття. Рисунок 5.30 дає можливість оцінити ефективність алгоритму для конкретної мережі, визначити кількість необхідних циклів оптимізації та встановити характер фазової динаміки переходу від хаотичної структури зв'язків до впорядкованої системи інтелектуальних спільнот [323].

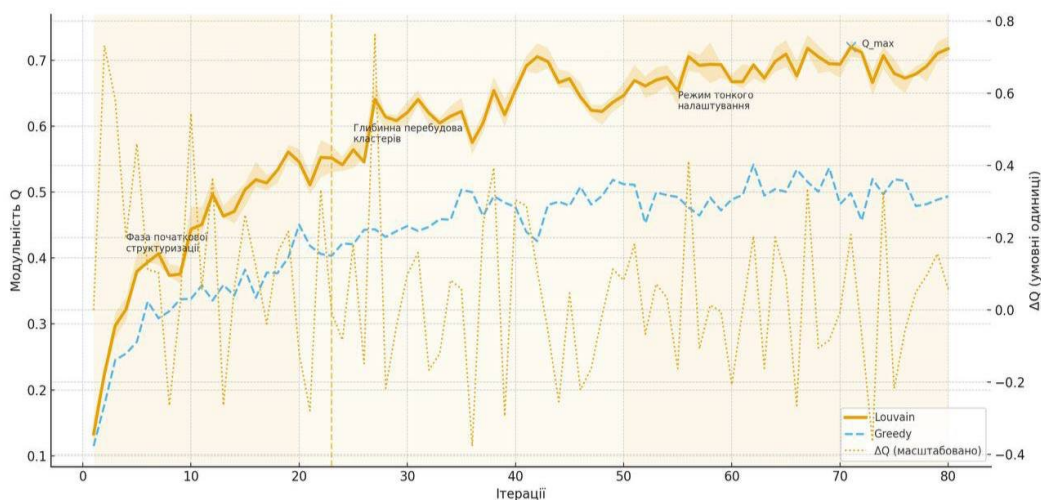


Рис. 5.30. Залежність модульності від кількості ітерацій Louvain-алгоритму
(розроблено автором на основі [323])

Підхід дозволяє відстежити еволюцію зв'язків між вузлами, оцінити стабільність кластерів та зафіксувати моменти, коли перехід між рівнями призводить до суттєвого зростання модульності (рис. 5.31) [281].

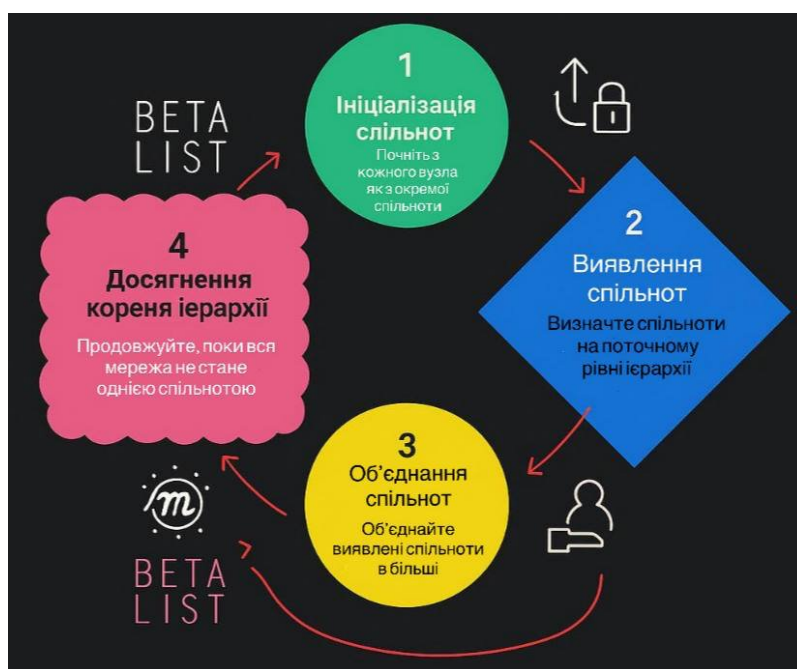


Рис. 5.31. Ієрархічна схема Louvain-алгоритму
(розроблено автором на основі [363])

Таблиця 5.4 дає змогу наочно показати, наскільки відрізняються жадібні, ітераційні та оптимізаційні методи за здатністю формувати стійкі інтелектуальні спільноти, враховувати ваги зв'язків і адаптуватися до динаміки комунікацій.

Таблиця 5.4.

Порівняльна характеристика методів кластеризації для мережі учасників проєкту
(розроблено автором на основі [350])

Метод кластеризації	Точність виявлення спільнот	Швидкість	Масштабованість	Гнучкість щодо ваг зв'язків	Особливості застосування у BIM/IPD
<i>Жадібні методи (greedy)</i>	Середня, залежить від початкових умов, може пропускати глобальні структури	Висока для малих і середніх мереж	Обмежена, зростає час при великих графах	Низька, слабо реагують на зміни ваг	Підходять для швидкого попереднього аналізу мережі, коли необхідна базова сегментація
<i>Методи переміщень (relocation)</i>	Вища за жадібні, добре оптимізують локальну структуру	Середня, залежить від кількості ітерацій	Краще ніж у greedy, але зростання складності значне	Висока, чутливі до локальних вагових змін	Доцільні при моделюванні динамічних комунікацій та уточненні структури кластерів
<i>Оптимізаційні методи (modularity maximization)</i>	Висока, забезпечують стійкі спільноти	Нижча через складні обчислення	Висока, здатні працювати з великомасштабними мережами	Висока, повністю враховують ваги ребер	Найточніші для BIM/IPD, забезпечують формування інтелектуальних спільнот
<i>Louvain-алгоритм</i>	Дуже висока, знаходить якісні спільноти з високим Q	Дуже висока, найкраща серед методів	Дуже висока, придатний для великих мереж	Висока, коректно працює із зваженими зв'язками	Ідеальний для реальних BIM/IPD мереж, виявляє стійкий багато-рівневу структуру та метаспільноти
<i>Стохастичні еволюційні підходи (рої, GA)</i>	Висока, особливо при складних топологіях	Середня/нижче через ітеративність	Висока, добре працюють з стандартними структурами	Дуже висока, гнучкі до будь-яких типів ваг	Доречні для адаптивних моделей у складних, динамічних проектних середовищах

Практичні випробування доводять, що методи кластеризації, Louvain, Leiden, модульні оптимізації та стохастичні еволюційні алгоритми, можуть ефективно працювати з реальними BIM/IPD мережами, котрі налічують тисячі вузлів і десятки тисяч зв'язків. Їх застосування дозволяє виділяти стійкі спільноти, визначати приховану структуру комунікацій та підтримувати роботу мережевих інформаційних платформ у режимі реального часу [339]. Завдяки цьому кластеризація стає інструментом стратегічного значення, що допомагає організаціям підвищувати адаптивність, скорочувати комунікаційні витрати та формувати більш згуртовані команди учасників проєкту (рис. 5.32).



Рис. 5.32. Еволюція кластерних структур та модальностей під час навчання системи
(розроблено автором на основі [339])

РОЗДІЛ 6. НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ КОГНІТИВНИХ ВІМ-СИСТЕМ У БУДІВНИЦТВІ

6.1. Інтеграція технологій BIM і Big Data як основа генерування нових знань у будівництві

Незважаючи на широкий спектр можливостей, однією з галузей, де потенціал великих даних ще не реалізовано повністю, залишається будівельна сфера. У порівнянні з багатьма іншими секторами, будівництво відоме своїм повільним темпом впровадження інноваційних рішень. Основними причинами такого відставання є недостатні інвестиції, спрямовані на зміну технологій, а також обмежений доступ до даних, необхідних для ефективної роботи інструментів обробки великих даних. Однак завдяки стрімкому розвитку сучасного апаратного та програмного забезпечення відкриваються нові можливості для використання великих даних у цій сфері.

Згідно з опитуванням, проведеним компанією Sage серед представників будівельної галузі, фахівці висловили свої очікування щодо перспектив застосування великих даних:

- 57% прагнуть отримувати послідовну та актуальну фінансову інформацію та дані про проекти;
- 48% хочуть отримувати попередження про виникнення важливих ситуацій;
- 41% очікують, що великі дані сприятимуть прогнозуванню подій і допоможуть уникати ризиків;
- 14% бажають виявляти фактори, які впливають на збільшення або зменшення прибутку.

Оскільки великі дані підтримують прийняття зважених рішень, наука про прийняття рішень пропонує теоретичну основу для пояснення інтересу до їх використання. Різноманітність доступних даних дає змогу не лише підвищувати

достовірність звітів про поточний стан об'єктів і прогнозів їх експлуатації, а й своєчасно попереджати про перевищення критичних показників і якісніше оцінювати ризики [285].

Flanagan і Lu підкреслюють, що управління будівельними проектами передбачає використання доступної інформації та знань для обґрунтування рішень, а також сприяє створенню додаткових можливостей для вдосконалення різних аспектів діяльності на таких ключових етапах, як планування, проектування та реалізація будівельних робіт. З позицій теорії прийняття рішень, менеджмент формує мережу взаємопов'язаних рішень, що ґрунтуються на наявних інформаційних і знанневих ресурсах. Основною метою ефективного управління даними та інформацією є підтримка процесу прийняття рішень.

Широке впровадження моделей, створених на основі великих масивів емпіричних даних, сприяє подоланню різноманітних обмежень у процесі розвитку. Наприклад, концепція обмеженої раціональності вказує на три основні обмеження, з якими стикаються особи, що приймають рішення: - недостатність інформації про можливі альтернативи та очікувані наслідки їх обрання; - обмежені когнітивні можливості людини для обробки наявної інформації; - обмежений часовий ресурс, виділений на ухвалення рішень.

Великі дані здатні істотно зменшити вплив згаданих обмежень, забезпечуючи прийняття більш обґрунтованих і надійних рішень. Часто ухвалювачі рішень працюють із невеликими вибірками даних, зібраними через традиційні методи, як-от вибіркове опитування, експеримент чи інші дослідницькі підходи. Однак застосування технологій великих даних дозволяє уникнути потенційної упередженості, яка може бути притаманна малим наборам даних, та сформувати ширший і точніший контекст для визначення об'єктивної істини [158].

Різноманітність великих даних значно підвищує якість інформаційного забезпечення для тих, хто приймає рішення. Їхній значний обсяг дає змогу виявляти приховані закономірності, невідомі раніше кореляції та іншу цінну інформацію, що сприяє підвищенню ефективності управлінських процесів. Рисунок 6.1 демонструє вплив даних на прийняття рішень.

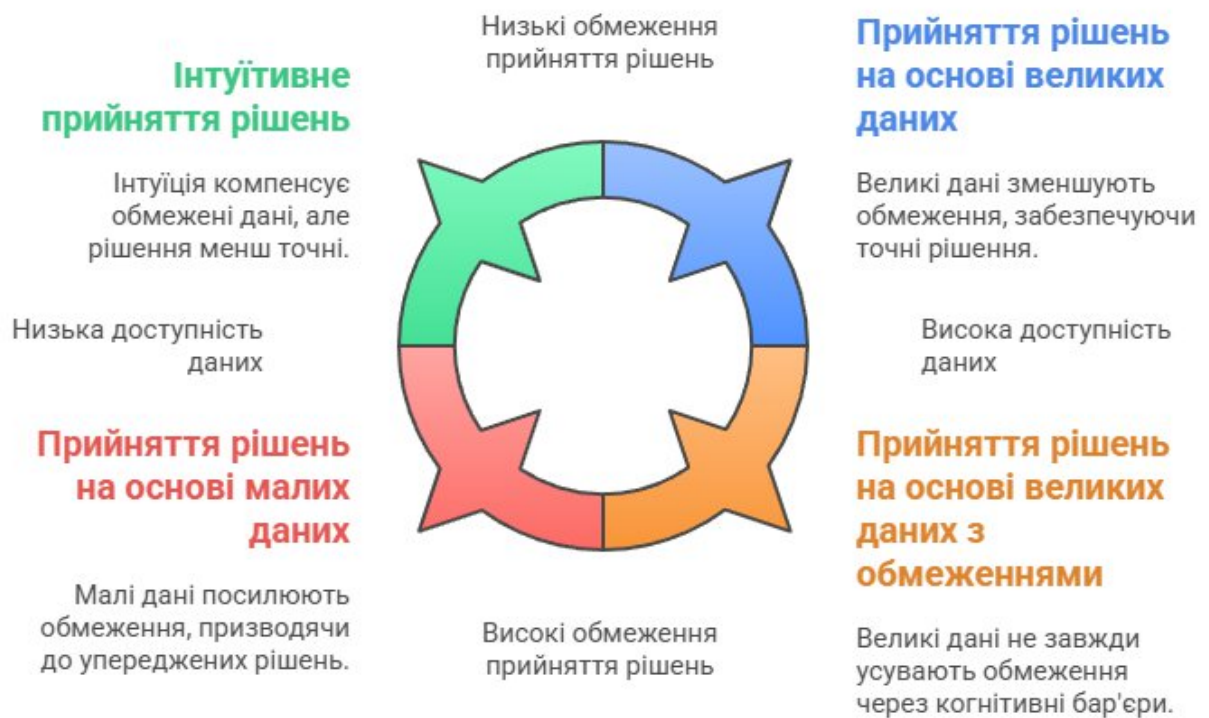


Рис. 6.1. Вплив великих даних на обмеження прийняття рішень (розроблено автором на основі [158])

Великі обсяги даних, що надходять із високою швидкістю, значно перевершують когнітивні можливості людського розуму стосовно їх ефективної обробки. У зв'язку з цим виникає необхідність застосування розвинених інформаційних та комунікаційних технологій. Як зауважує Padhy, традиційні інструменти управління даними виявили свою неспроможність якісно та оперативно опрацьовувати високі обсяги інформації. Зростаюча швидкість надходження великих даних додає труднощів, суттєво скорочуючи час, доступний для прийняття рішень. Отже, аналітики великих даних повинні оперативно опрацьовувати та аналізувати дані з метою отримання корисної інформації для підтримки прийняття рішень. Використання великих даних може приносити максимальну користь, якщо аналіз здійснюється в режимі реального часу. Організації, що впроваджують швидкі процеси ухвалення рішень, здатні більш ефективно використати переваги аналізу даних у реальному часі, що забезпечує їм суттєві конкурентні переваги.

Для відображення взаємозв'язку між характеристиками великих даних і процесом ухвалення управлінських рішень у будівельній сфері доцільно подати формулу. Вона демонструє, що ефективність управління безпосередньо залежить від обсягу, різноманітності та швидкості обробки даних, а також від ступеня подолання когнітивних, часових та інформаційних обмежень, які традиційно впливають на прийняття рішень.

$$V_{\text{упр}} = f\left(\frac{G_{\text{обсяг}} \times G_{\text{різн}} \times G_{\text{швид}}}{C_{\text{когн}} + T_{\text{час}} + I_{\text{інф}}}\right), \quad (6.1)$$

де: $V_{\text{упр}}$ — ефективність управлінських рішень у будівельному проєкті; $G_{\text{обсяг}}$ — обсяг доступних даних; $G_{\text{різн}}$ — різноманітність джерел і типів даних; $G_{\text{швид}}$ — швидкість

надходження та обробки даних (real-time analytics); $C_{\text{когн}}$ — когнітивні обмеження людини (здатність сприймати й аналізувати інформацію); $T_{\text{час}}$ — часові обмеження, доступні для ухвалення рішення; $I_{\text{інф}}$ — інформаційні обмеження (неповнота чи неточність даних).

Ефективність управління $V_{\text{упр}}$ прямо пропорційна характеристикам великих даних (обсягу, різноманіттю та швидкості їх обробки) й обернено пропорційна сукупним обмеженням когнітивного, часово-інформаційного характеру. Чим більші обсяги і різноманітня даних та вища швидкість їх аналізу — тим повніше знімаються обмеження, а управлінські рішення стають більш обґрунтованими, точними та стратегічно ефективними [288].

Раніше було розглянуто взаємозв'язок між даними, інформацією та знаннями. Згідно з поширеною думкою, дані являють собою необроблені числа або факти; інформація — це оброблені, структуровані та організовані дані; а знання визначаються як перевірена інформація. Таким чином, дані є обов'язковою умовою для формування інформації, тоді як інформація створює основу для генерування знань. Alavi та Leidner запропонували більш деталізоване визначення знань як інформації, яку людський розум перетворив через інтелектуальну обробку, включаючи факти, концепції, ідеї та судження, посилені інтерпретацією. Основною метою збору даних є здобуття корисної інформації, яка слугує базою для напрацювання знань і подальшого прийняття обґрунтованих рішень.

Зазвичай організації застосовують формалізований підхід до обробки інформації та встановлення пріоритетів під час ухвалення рішень. У процесі збору й аналізу даних результати перетворюються у практичну інформацію, яка стає основою для стратегічних дій. Дослідники, зокрема Poletto зі співавторами, припускають існування масивного «універсального сховища», яке виконує роль процесорного центру з інтегрованим інтелектом й інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом. Це «сховище» має бути насиченим даними з широкого спектра внутрішніх і зовнішніх джерел. Сучасні дослідження та практичний досвід упровадження інформаційного моделювання у будівництві свідчать, що таким «універсальним сховищем» може стати технологія BIM (Building Information Modeling) [291].

Великі дані, що активно впроваджуються у будівельній галузі, не завжди мають безпосередній зв'язок із технологією інформаційного моделювання будівель (BIM). Водночас, застосування BIM як одного з найважливіших інноваційних рішень у цій сфері відкриває унікальні перспективи для ефективного використання великих даних. Завдяки стрімкому розвитку інформаційних технологій та управлінських підходів, інструменти, що інтегруються у BIM-платформи, набули широкої популярності серед фахівців із проєктування та інженерних робіт (табл. 6.1). BIM здатний інтегрувати та обробляти широкий спектр інформації, включаючи геометричні, семантичні й топологічні дані. Завдяки цьому він поступово перетворюється на ключовий інструмент для збору, зберігання та управління великими обсягами даних у будівельній галузі.

Таблиця 6.1.

Аналіз використання великих даних у будівельній галузі
(розроблено автором на основі [291])

Аспект	Зміст / характеристика
Поточний стан галузі	Будівництво відзначається повільним впровадженням інноваційних

	технологій через недостатні інвестиції та обмежений доступ до даних.
Основні причини відставання	Недостатнє фінансування цифрової трансформації, низький рівень автоматизації збору даних, відсутність ефективних аналітичних інструментів.
Очікування фахівців (за даними Sage)	57% — отримання актуальної фінансової інформації; 48% — попередження про ризики; 41% — прогнозування подій; 14% — аналіз прибутковості.
Роль великих даних	Забезпечують підтримку прийняття рішень, підвищення достовірності звітності, прогнозування стану об'єктів і мінімізацію ризиків.
Наукове підґрунтя	Теорія прийняття рішень (Flanagan, Lu) підкреслює значення даних і знань для оптимізації управління будівельними процесами.
Основні обмеження	Когнітивні (людські), часові та інформаційні бар'єри, які великі дані допомагають подолати.
Переваги впровадження	Прийняття більш обґрунтованих рішень, підвищення точності прогнозів, зменшення упередженості та підвищення ефективності управління.
Інформаційна модель	Взаємозв'язок «дані → інформація → знання»; створення «універсального сховища» даних у BIM як ключового аналітичного інструменту.
Роль BIM	Інтеграція великих даних у процес проєктування, будівництва та експлуатації; управління геометричною, семантичною та топологічною інформацією.
Загальний ефект	Підвищення стратегічної ефективності, конкурентоспроможності та стійкості будівельних компаній.

Особлива цінність BIM полягає в його здатності акумулювати знання, які постійно оновлюються й розширюються шляхом інтеграції даних у режимі реального часу з різних систем. Отримані дані надходять до BIM-центрованої системи з урахуванням їх обсягу, різноманітності та швидкості появи. Основні переваги великих даних— це їх масштабність, швидкість обробки та багатоманітність, які відкривають нові можливості для ефективного отримання інформації й знань, критично важливих для підтримки процесу прийняття рішень. Стрімке вдосконалення інформаційних і обчислювальних технологій сприяло появі технічних розробок, що забезпечують ефективний збір і обробку великих даних. Такого роду інформація може бути отримана як з внутрішнього середовища будівельного проєкту, так і з зовнішніх джерел.

BIM-моделі є здебільшого великими структурованими даними, які можуть бути доступними всім зацікавленим сторонам. Проте при інтеграції цих моделей із додатковими інформаційними системами або сенсорними технологіями, такими як геоінформаційні системи (ГІС), системи глобального позиціонування (GPS), доповнена реальність (AR), лазерне сканування чи автоматична ідентифікація об'єктів (RFID), дані поступово набувають напівструктурованої форми. Запровадження таких сучасних

технологій і засобів сприяє експоненційному зростанню як обсягів, так і складності даних, що значним чином впливає на збільшення інформаційної бази в контексті будівельної індустрії.

Зовнішні дані можуть охоплювати нормативно-правові акти, політики, процедури, стандарти та регламенти. Внутрішні ж великі дані можуть включати геометричну й просторову інформацію для розв'язання завдань у різних аспектах будівництва. Зокрема, це стосується проектування в межах усіх інженерних дисциплін проекту, контролю термінів реалізації та управління ресурсами, відстеження будівельних процесів, розрахунку й моніторингу витрат, оцінки стану будівельного майданчика, забезпечення безпеки та управління інфраструктурою готових об'єктів нерухомості [78].

Для відображення процесу переходу від сирих даних до знань, що використовуються у BIM-середовищі, подано формулу взаємодії між ключовими елементами інформаційного циклу. Вона демонструє, як інтеграція внутрішніх і зовнішніх даних через сучасні технології обробки забезпечує формування структурованої інформації, яка згодом трансформується у знання для підтримки управлінських рішень.

$$N = f(I) = f(g(V_{\text{вн}} + V_{\text{зовн}}, J_{\text{обр}}, L_{\text{як}})), \quad (6.2)$$

де: N — знання (отримані результати інтелектуальної обробки інформації); I — інформація, що формується з даних після обробки; $V_{\text{вн}}$ — внутрішні дані будівельного проекту (геометричні, просторові, ресурсні, часові тощо); $V_{\text{зовн}}$ — зовнішні дані (нормативи, стандарти, політики, регламенти, умови середовища); $J_{\text{обр}}$ — технологічні процеси обробки даних (BIM, ГІС, GPS, AR, RFID, сенсорні системи); $L_{\text{як}}$ — якість і точність даних, що впливають на достовірність результатів; g — функція структуризації, обробки та організації даних; f — інтелектуальна обробка інформації людиною чи системою, яка перетворює її в знання.

Джерела даних у межах будівельного проекту характеризуються значною складністю та масштабністю. Однак їхнє коректне застосування може генерувати об'ємний масив інформації та нових знань. Використання технологій великих даних у поєднанні з інформаційним моделюванням будівель (BIM) дозволяє інтегрувати та репрезентувати інформацію щодо різних аспектів об'єкта будівництва [268].

Для відображення структури інтеграції великих даних у BIM-систему подано узагальнений рисунок 6.2, що демонструє ключові складові інформаційного середовища. Він відображає, як різноманітні джерела даних консоліднуються в єдине BIM-центричне сховище, утворюючи основу для ефективного управління будівельними процесами.

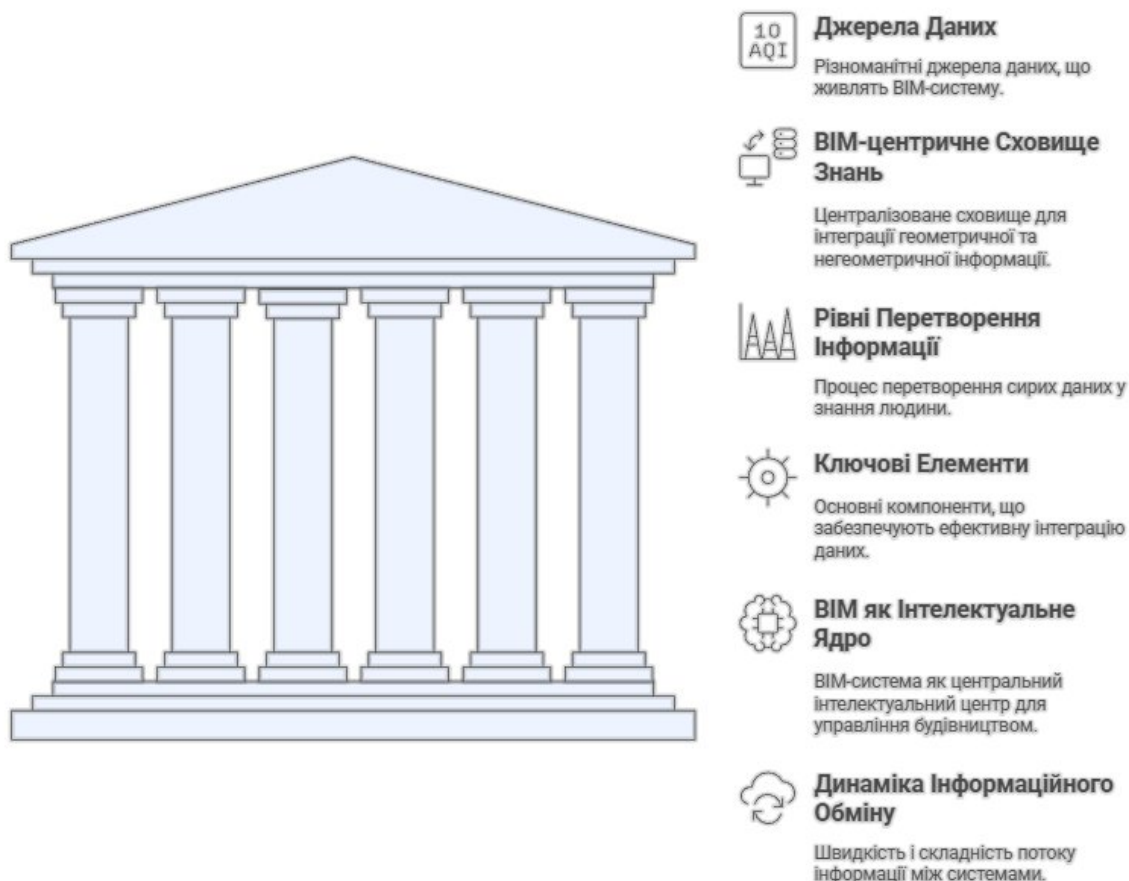


Рис. 6.2. Інтеграція Bi Data та BIM (розроблено автором на основі [268])

Упродовж життєвого циклу будівельного об'єкта виникає значна кількість напрямів, які потребують збору даних та здійснення обґрунтованих рішень. Кожен із таких сценаріїв характеризується застосуванням індивідуальних заходів і методик збору інформації. Дані, які були раніше зібрані, оброблені та використані для досягнення поставлених завдань, можуть надалі слугувати джерелом знань і відправною точкою для розв'язання завдань у інших аспектах реалізації проєкту.

Технології інформаційного моделювання будівель (BIM) разом із великими даними виступають важливими платформами для збору та обміну інформацією на етапах життєвого циклу об'єкта. Завдяки забезпеченню всім учасникам процесу реалізації проєкту доступу до спільного інформаційного середовища, а також можливості використовувати ці дані для розрахунків, аналітичних досліджень і генерування нових знань, процес ухвалення рішень у рамках різноманітних будівельних дисциплін відбувається скоординовано й оперативно [245].

Раннє впровадження BIM-технологій у поєднанні з великими даними дозволяє ефективно генерувати суттєво більший обсяг інформації, що сприяє ґрунтовнішому аналізу проєкту. Останнє, своєю чергою, дає змогу своєчасно вносити необхідні корективи, скорочувати витрати на спорудження та подальшу експлуатацію об'єкта. Аналіз проєкту може здійснюватися на будь-якому з етапів його життєвого циклу зі збиранням відомостей із BIM-системи чи інших баз даних. Одержані результати аналізу

передаються до інформаційної моделі для прийняття оптимальних рішень або подальшого застосування в інших процесах і на етапах експлуатації.

Поточна практика роботи з великими даними свідчить, що ці ресурси часто залишаються недостатньо використаними після завершення будівельного проєкту. Зібрані під час реалізації проєкту об'ємні масиви інформації та здобутих знань можна розглядати як важливий корпоративний актив. Їхнє ефективне використання сприяє формуванню точних бізнес-прогнозів, більш обґрунтованому ухваленню управлінських рішень, підвищенню продуктивності компанії та зміцненню її конкурентних позицій. Колекціоновані дані, які виникають у ході реального виконання бізнес-процесів, зазвичай перевершують за якістю ті, що отримуються через експерименти або моделювання, оскільки базуються на практичному досвіді. З огляду на це передбачається, що власники таких великих даних ставатимуть більш зацікавленими у їх захисті як стратегічно цінного ресурсу і дедалі менш охоче ділитимуться ними з іншими суб'єктами, навіть якщо їхня економічна цінність залишається недооціненою [130].

Для узагальнення процесів обробки, інтеграції та повторного використання даних протягом усього життєвого циклу будівельного об'єкта подано формулу. Вона відображає, що результативність рішень визначається сукупністю внутрішніх і зовнішніх даних, рівнем технологічної обробки, а також здатністю системи накопичувати та застосовувати отримані знання на різних етапах проєкту.

$$B_{жц} = f\left(\sum_{i=1}^n (K_i^{BIM} + K_i^{ext}) \times T_{обр} \times E_{повт} \times C_{зн}\right), \quad (6.3)$$

де: $B_{жц}$ — ефективність управління протягом життєвого циклу об'єкта; K_i^{BIM} — дані, отримані з BIM-моделі на етапі i ; K_i^{ext} — зовнішні дані (сенсори, ГІС, GPS, AR, нормативи тощо); $T_{обр}$ — технологічна обробка даних (аналітика, моделювання, інтеграція); $E_{повт}$ — коефіцієнт повторного використання інформації та знань між етапами; $C_{зн}$ — якість або цінність знань, отриманих у процесі обробки.

Розгляньмо поєднання теоретичних і практичних аспектів, пов'язаних із BIM (Building Information Modeling) і використанням великих даних у будівельній галузі. Ці напрями стають дедалі важливішими та активно розвиваються.

На етапі планування аналіз великих даних дозволяє:

- оцінити конструктивні параметри майбутньої будівлі;
- підібрати оптимальні будівельні матеріали;
- визначити найкраще місце для розташування об'єкта з урахуванням клімату, геологічних умов, транспортної інфраструктури, рівня ділової активності;
- передбачити бюджетні витрати й очікуваний прибуток від реалізації проєкту;
- врахувати екологічні аспекти;
- передбачити потенційний імідж та сприйняття проєкту.

На основі цих критеріїв можна розробити кілька варіантів проєктів та порівняти їх між собою. Аналіз досвіду реалізації схожих проєктів допомагає виявити закономірності, оцінити ризики й їхній вплив на витрати та строки виконання. Використовуючи великі дані, можливо моделювати різні сценарії розвитку подій та вживати запобіжних заходів заздалегідь. Наприклад, дослідження схожих проєктів дає змогу встановити, які матеріали найчастіше призводять до перевищення бюджету. Також завдяки цьому аналізу можна

виявити колізії між майбутнім об'єктом і наявною інфраструктурою, такими як дороги чи залізничні шляхи, щоб запобігти проблемам на стику старих і нових систем [94].

На етапі проектування перспективними напрямками стають:

- розроблення експертних систем для аналізу проектних рішень;
- впровадження концепції варіантного проектування на основі BIM
- моделей із застосуванням інтелектуального аналізу документації;
- використання глибинного аналізу для виявлення прихованих даних, що сприяють ухваленню ефективних проектних рішень;
- підвищення точності виявлення колізій у BIM-моделях;
- якісний аналіз ризиків під час проектування.

Ці підходи уможливають створення більш точного й ефективного проектування майбутніх будівель, знижуючи ризики та оптимізуючи ресурси.

Для підвищення ефективності будівельного виробництва, зокрема під час виконання будівельно-монтажних робіт, аналітика даних традиційно має вирішальне значення. На сьогодні вже існують інструменти, що надають можливість учасникам проекту виявляти й передбачати небезпечні ситуації. Проте цей напрямок залишається вкрай актуальним і потребує подальшого вдосконалення. Сучасні методи обробки даних разом із прогресом комп'ютерних технологій відкривають можливість аналізувати значну кількість чинників, що підвищує точність у класифікації ризиків за окремими групами [156].

Для наочного розуміння взаємозв'язку між рівнем інтеграції даних та стратегічною цінністю інформаційних процесів у будівництві представлено рисунок 6.3. Він демонструє, як різні підходи до збору та використання даних впливають на ефективність управління проектом і можливості аналітики.

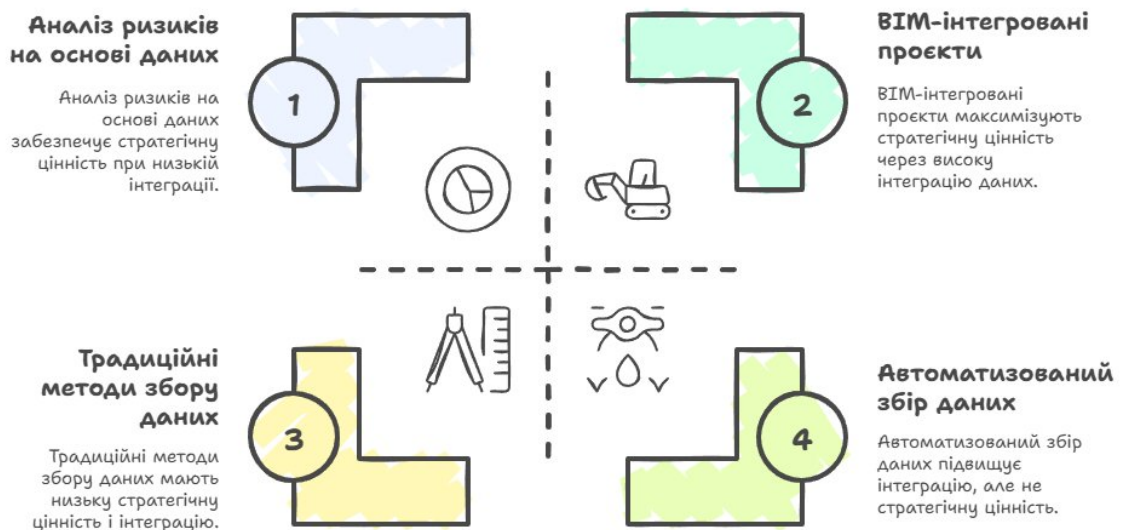


Рис. 6.3. Стратегічне використання даних у будівельних проектах
(розроблено автором на основі [156])

Рисунок відображає чотири типові сценарії роботи з даними у будівельних проектах: від традиційного збору до повністю інтегрованих BIM-процесів. Кожен із секторів ілюструє рівень стратегічної цінності та ступінь інтеграції — від низьких

показників при ручному зборі до високих при застосуванні ВІМ і аналітики великих даних. Такий підхід дозволяє визначити оптимальний баланс між автоматизацією, аналітикою й ефективністю управлінських рішень.

Для узагальнення впливу даних, технологічної обробки та знань на управління будівельним об'єктом подано формулу. Вона відображає взаємодію між ВІМ-даними, зовнішніми джерелами та ефективністю їх повторного використання протягом життєвого циклу проєкту.

$$C_{ж} = \sigma \left(\frac{M_{повт}}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left(U_i^{BIM} \times U_i^{ext} \right)^{\frac{1}{2}} \times \ln(1 + W_{обр,i} \times Q_{зн,i}) \right] \right) \quad (6.4)$$

де: $C_{ж}$ — інтегральна ефективність управління протягом життєвого циклу об'єкта; n — кількість етапів життєвого циклу; U_i^{BIM} — обсяг або значущість даних із ВІМ-системи на етапі i ; U_i^{ext} — обсяг або значущість зовнішніх даних (сенсори, ГІС, GPS, AR тощо) на етапі i ; $W_{обр,i}$ — ефективність технологічної обробки даних (аналітика, інтеграція, моделювання) на етапі i ; $Q_{зн,i}$ — якість або цінність знань, отриманих із даних після їх інтерпретації на етапі i ; $M_{повт}$ — коефіцієнт повторного використання накопиченої інформації та знань між етапами; σ — функція нормалізації, що відображає обмеження системи (людські, часові, технологічні) та забезпечує приведення ефективності до реалістичного масштабу.

У ході будівельно-монтажних робіт для збору великих обсягів даних на будівельних майданчиках застосовуються камери відеоспостереження та сенсори різного призначення, які реєструють технологічні параметри об'єкта. Отримані дані зберігаються у спеціальних базах і піддаються аналізу за допомогою моделей машинного навчання із застосуванням алгоритмів класифікації, зокрема для розпізнавання зображень. Розвиток сенсорних мереж і збільшення обчислювальних потужностей сприяють збору даних у режимі реального часу. Водночас досліджується використання сучасних технологій, таких як лазерне сканування та фотограмметрія, для збору інформації про стан будівельних майданчиків у реальному часі та її синхронізації з цифровими системами для створення актуалізованої ВІМ-моделі [11].

Крім цього, поєднання ВІМ з прогресивними інформаційними та комунікаційними технологіями дозволяє ухвалювати більш обґрунтовані рішення щодо керування матеріальними ресурсами, такими як матеріали та інструменти. Наприклад, компанія Nick Savko & Sons, яка спеціалізується на землерийних роботах, оснастила свою спецтехніку системами глобального позиціонування для дистанційного моніторингу. Ці пристрої збирали дані про тривалість робочих циклів машин, простої, продуктивність тощо. Після аналізу отриманої інформації менеджери компанії змогли визначити необхідну кількість техніки для виконання робіт, а також виявити машини, які вигідніше використовувати на інших об'єктах.

У процесі будівельних робіт часто виникає потреба у закупівлі, зберіганні та транспортуванні великої кількості матеріалів та обладнання. Для оптимізації цього процесу також можна застосовувати великі дані у поєднанні з ВІМ-моделлю. Інтеграція різноманітних активів в єдину базу із системою нагадувань та оповіщень дозволяє співробітникам легко відстежувати місцезнаходження матеріалів чи обладнання,

отримувати інформацію про початок наступних етапів робіт та враховувати необхідність використання конкретних ресурсів [45].

На рисунку 6.4 представлено взаємозв'язок між етапами збору, аналізу та інтеграції даних у BIM-систему, який формує основу для переходу від неефективного до оптимізованого будівництва. Діаграма відображає роль великих даних як ключового елементу, що об'єднує технологічні процеси в єдину систему управління.

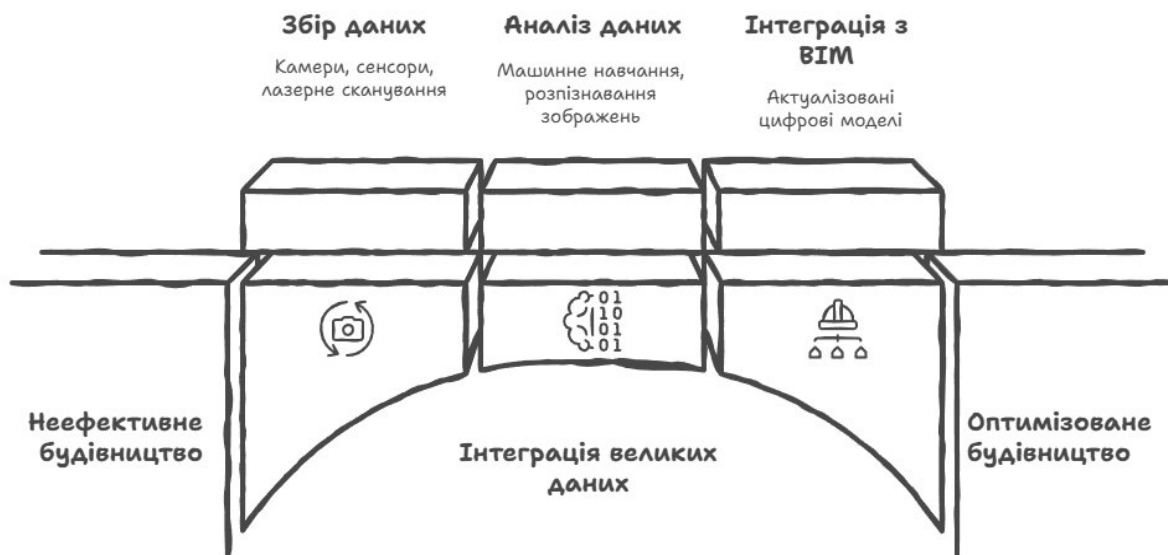


Рис. 6.4. Оптимізація будівництва за допомогою великих даних
(розроблено автором на основі [45])

На етапі управління нерухомістю використання технологій великих даних має значний потенціал. Інтегрування сенсорів та датчиків дозволяє виявляти технічні дефекти, попереджати про можливі аварійні ситуації у комунікаційних системах, контролювати екологічні параметри, вимірювати тиск, температуру, інтенсивність навантажень, а також аналізувати рух людських потоків і багато інших аспектів. Системи збору та обробки даних впроваджуються у різні складові робочих процесів, роблячи інформацію доступною для аналізу й допомагаючи розробляти актуальні рішення. Останні десятиліття характеризуються активними дослідженнями методів діагностики та виявлення несправностей, спрямованими на покращення обслуговування будівельних об'єктів протягом їх експлуатації. Інтернет речей і сенсори забезпечують постійний зв'язок між фізичною конструкцією та її цифровою моделлю, дозволяючи в реальному часі проводити моніторинг технічного стану об'єкта [221].

Для узагальнення впливу сенсорних технологій, аналітичних моделей і цифрових систем на ефективність управління будівельними процесами подано формулу. Вона відображає взаємодію потоків даних, машинного аналізу та інтеграції з BIM у режимі реального часу.

$$V_{\text{буд}} = (R_{\text{сенси}} + R_{\text{віз}}) \times S_{\text{анал}} \times H_{\text{час}} \times (A_{\text{акт}} + P_{\text{інт}}), \quad (6.5)$$

де: $V_{\text{буд}}$ — ефективність управління під час будівельно-монтажних робіт; $R_{\text{сенси}}$ — дані від сенсорів і датчиків; $R_{\text{віз}}$ — візуальні дані (відеоспостереження, лазерне

сканування, фотограмметрія); $S_{анал}$ — моделі машинного навчання й аналітична обробка; $H_{час}$ — коефіцієнт оновлення даних у режимі реального часу; $A_{акт}$ — актуалізована BIM-модель; $P_{інт}$ — інтеграція інформаційно-комунікаційних технологій (IoT, GPS, ERP тощо).

Управління активами, що включають будівлі, обладнання та інфраструктурні елементи для їх функціонування, здійснюється власниками, керівниками та користувачами. Первісна вартість капіталовкладень часто є основним фактором під час прийняття рішень. Водночас прогнозування витрат на всьому життєвому циклі об'єкта створює основи для більш раціонального вибору. Витрати можуть охоплювати придбання чи проектування, експлуатацію, ремонт, запчастини, простої, профілактичне та прогнозне обслуговування, утилізацію і фінансові показники. Інформація, зібрана протягом життєвого циклу об'єкта, зокрема дані BIM, може надати детальний аналіз цих витрат за умови правильного підходу до їх збору та обробки [86].

Для визначення ключових чинників ефективного використання великих даних у будівельній галузі доцільно провести SWOT-аналіз (рис. 6.5). Такий підхід дозволяє системно оцінити сильні та слабкі сторони, можливості й загрози, що впливають на впровадження інтелектуальних технологій у процесах моніторингу, управління та технічного обслуговування об'єктів.



Рис. 6.5. Застосування великих даних у будівництві
(розроблено автором на основі [86])

Діаграма SWOT відображає основні аспекти впровадження великих даних у будівництві. Серед сильних сторін — моніторинг у реальному часі та інтеграція з BIM, які забезпечують підвищену ефективність планування і використання ресурсів. До слабких сторін і загроз віднесено складність збору та обробки даних, а також технічні дефекти, що можуть спричиняти аварійні ситуації у комунікаційних системах.

Технології збору даних із датчиків у будівлях, мостах та інших конструкціях дозволяють контролювати численні параметри. Наприклад, хоча комунальні підприємства мають доступ до складних білінгових систем, вони часто не володіють інструментами глибокої аналітики енергоспоживання різними будівельними системами, а також температурного та вологісного режиму. У торгових центрах, офісах і житлових комплексах впровадження механізмів енергозбереження може здійснюватися в реальному часі для оптимізації витрат.

Ще однією важливою тенденцією є перехід BIM від традиційного використання на локальних ПК до хмарного середовища. Хмарні технології забезпечують зручний доступ до обчислювальних ресурсів через мережу — включно з серверами, програмами й додатками — із мінімальними технічними зусиллями. BIM у хмарному форматі надає змогу доступу до загальних ресурсів через різноманітні пристрої: комп'ютери, смартфони чи планшети. Окрім функцій проектування, візуалізації та 3D-моделювання, хмарний BIM стає багатофункціональною платформою управління даними життєвого циклу. Він дозволяє аналізувати такі параметри як час, простір, витрати, стійкість і управління готовим об'єктом [28].

Хмарний BIM можна класифікувати на три основні категорії: приватний хмарний BIM, публічний хмарний BIM і змішаний хмарний BIM. Приватний хмарний BIM належить одній організації і використовується виключно для її потреб. У свою чергу, публічний хмарний BIM забезпечує вільний доступ великої кількості користувачів до відкритих онлайн-бібліотек BIM, що дозволяє не лише використовувати наявні елементи бібліотек, але й збагачувати їх шляхом завантаження власних об'єктів. Зазначимо, що у випадку публічного хмарного BIM користувачі зазвичай відмовляються від інтелектуальних прав на завантажені елементи. Окрім того, публічний хмарний BIM може використовуватися галузевими спільнотами або професійними асоціаціями для гармонізації локальних стандартів BIM.

$$S_{BIM}^{cloud} = \frac{(D+J) \times (P_{велек} + W_{хмар})}{(B+M) + N_{техн}}, \quad (6.6)$$

де: S_{BIM}^{cloud} — ефективність управління та взаємодії в хмарному середовищі BIM; D — сильні сторони (моніторинг у реальному часі, інтеграція з BIM, енергоефективність); J — можливості (хмарна співпраця, доступ до даних, масштабованість); B — слабкі сторони (складність збору й обробки даних, технічні обмеження); M — загрози (ризики аварій, втрати даних, кіберзагрози); $P_{велек}$ — використання технологій великих даних для аналітики та прогнозування; $W_{хмар}$ — рівень інтеграції BIM із хмарними платформами; $N_{техн}$ — технологічна складність впровадження та підтримки систем.

Змішаний хмарний BIM поєднує характеристики приватних і публічних систем. Наприклад, у межах одного проєкту учасники можуть спільно працювати над моделлю BIM, водночас певні її елементи можуть бути доступні для обмеженої групи осіб, або ж відкриті для громадського використання. Така інтеграція приватних і публічних технологій створює широкий спектр бізнес-можливостей для організацій, оскільки ці системи можуть бути комбіновані залежно від індивідуальних потреб. Під час переходу до

хмарного середовища BIM організації мають змогу обирати найбільш зручну та ефективну конфігурацію для своєї діяльності.

Однією з важливих переваг хмарного BIM є можливість роботи над спільною моделлю віддалено, за допомогою портативних пристроїв, без необхідності фізичного доступу до центральної моделі. Коли учасники проекту потребують актуальної інформації для прийняття рішень, наприклад у контексті дотримання встановлених строків реалізації проекту, вони можуть у будь-який момент отримати доступ до моделі. Хмарний BIM функціонує не лише як засіб відображення фізичних і функціональних параметрів об'єкта, але і як платформа для накопичення даних, які залишаються доступними у системі та сприяють утворенню великих обсягів даних [95].

З розвитком технологій і аналітики великих даних можна очікувати подальшого вдосконалення інструментів BIM. У перспективі вони зможуть забезпечити ще ширший спектр кількісної інформації в режимі реального часу для всіх учасників процесу реалізації будівельних проєктів, підвищуючи ефективність управління і прийняття рішень.

Завдяки інтеграції знань із різних дисциплін в межах інформаційного моделювання будівель (BIM), такі моделі можуть виступати центром збору і обробки великих даних. Фактично, BIM-модель, незалежно від її тривимірного візуального відображення та інформаційного насичення, можна розглядати як реляційну базу даних. Частина інформації спочатку закладена у модель, тоді як інші дані поступово генеруються та інтегруються протягом усього життєвого циклу проєкту. Завдяки BIM забезпечується зберігання й обробка як геометричних, так і негеометричних типів інформації, що характеризують проєкт. Геометрична інформація представлена параметрами розмірів, об'ємів, форм та просторових взаємозв'язків, у той час як негеометрична інформація охоплює дані про конкретні конструктивні елементи, характеристики матеріалів, будівельні графіки, витрати, а також дані систем управління підприємницькими ресурсами (ERP), геоінформаційних систем (ГІС), 3D-сканування, сенсорів і датчиків, камер спостереження та засобів комунікації в межах проєкту. За допомогою спеціалізованих цифрових інструментів стає можливим інтегрувати інформацію з зовнішніх джерел як з усім проєктом, так і з його окремими складовими елементами [342].

Розвиток цифрових технологій у будівництві сприяє формуванню інтегрованих систем управління, у яких поєднуються аналітика даних, хмарні рішення та інструменти співпраці. Такі системи дозволяють створювати динамічні моделі, що забезпечують комплексне управління всіма етапами життєвого циклу об'єкта та підвищують ефективність проєктної діяльності і зображені на рисунку 6.6.

Рисунок демонструє ключові складові, що формують основу ефективного управління будівельними проєктами. До них належать технології збору даних, хмарний BIM, інструменти співпраці, типи хмарних моделей, можливості віддаленої роботи та інтеграція геометричної й негеометричної інформації. Сукупна дія цих елементів забезпечує цілісний підхід до управління ресурсами, комунікаціями та даними, сприяючи підвищенню продуктивності галузі.

$$N_{BIM}^{mix} = (\delta H_{priv} + \varepsilon H_{pub}) \times O_{списи} \times Y_{int} \times D_{дан}, \quad (6.7)$$

де: N_{BIM}^{mix} — ефективність змішаного хмарного BIM у проєктному управлінні; H_{priv} — рівень використання приватного хмарного BIM (локальний, внутрішній доступ); H_{pub} — рівень використання публічного хмарного BIM (відкриті бібліотеки, спільний доступ); δ, ε — коефіцієнти вагомості, що відображають частку приватних і публічних систем у змішаній конфігурації; $O_{cni\bar{v}n}$ — ефективність інструментів співпраці та віддаленої взаємодії; Y_{int} — ступінь інтеграції геометричної та негеометричної інформації; $D_{дан}$ — актуальність і доступність даних у хмарному середовищі [259].

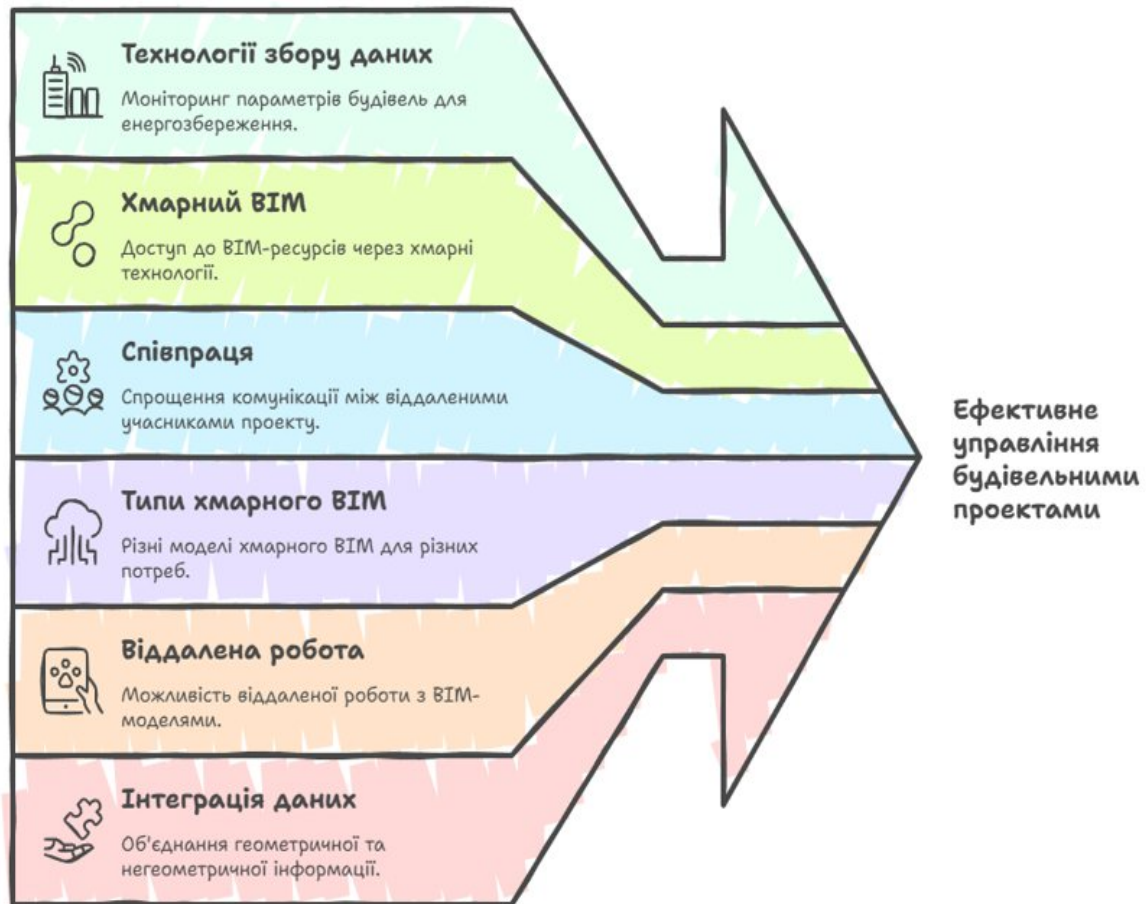


Рис. 6.6. Шлях до ефективності в будівництві
(розроблено автором на основі [259])

Накопичення даних у BIM-моделі сприяє перетворенню її на джерело для аналізу великих даних і отримання нових відомостей та знань. У сучасних будівельних проєктах після завершення кожного етапу залишається значний обсяг даних, які можуть бути цінним корпоративним активом. Ефективна їх обробка надає можливість підприємствам вдосконалювати прогнози та ухвалювати оптимальні управлінські рішення. Знання, отримані в рамках реалізації реальних проєктів і підтверджені практикою, є надійнішими порівняно з результатами лабораторних досліджень або моделювання, оскільки вони базуються на фундаментальних відомостях, які більшою мірою відповідають реальним умовам. Тому спеціалісти у сфері будівництва дедалі частіше віддають перевагу

використанню великих даних для генерації знань замість малих наборів даних, які підлягають ретельному відбору [9].

6.2. Механізми адаптації когнітивного управління до умов публічних будівельних замовлень

Будівельний сектор, включно з усіма учасниками процесу реалізації будівельно-інвестиційних проєктів, вирізняється значною фрагментацією більшості операційних процесів. У зв'язку з цим міжсекторальний підхід набуває критичної важливості для забезпечення стійких довгострокових інвестицій, розвитку професійних компетенцій та зміцнення загального потенціалу галузі. Ефективно застосована державна політика разом із механізмами публічних закупівель може стати потужним інструментом для підтримки позитивних змін у цьому секторі. У випадку відсутності належного стратегічного напрямку розвитку, ініційованого на рівні держави, рівень інвестицій у розвиток інформаційних технологій будівельного сектору залишатиметься недостатнім, що ризикує спричинити не вигідне співвідношення ціни й якості, а також посередній рівень продуктивності. Органи державної влади та організації публічного сектору мають потенціал відігравати провідну роль у стимулюванні повного використання можливостей цифрових технологій, що сприятиме підвищенню якості державних послуг та більш раціональному використанню бюджетних ресурсів [93].

Рисунок 6.7 відображає чотири ключові напрями, що формують основу стратегічного впровадження BIM у будівельній галузі. Кожен із них репрезентує окремий вектор розвитку — від формування концепції та ролі держави до співробітництва й нарощування потенціалу. Разом ці напрями демонструють взаємодоповнювану структуру, необхідну для системного та результативного переходу до BIM-технологій.

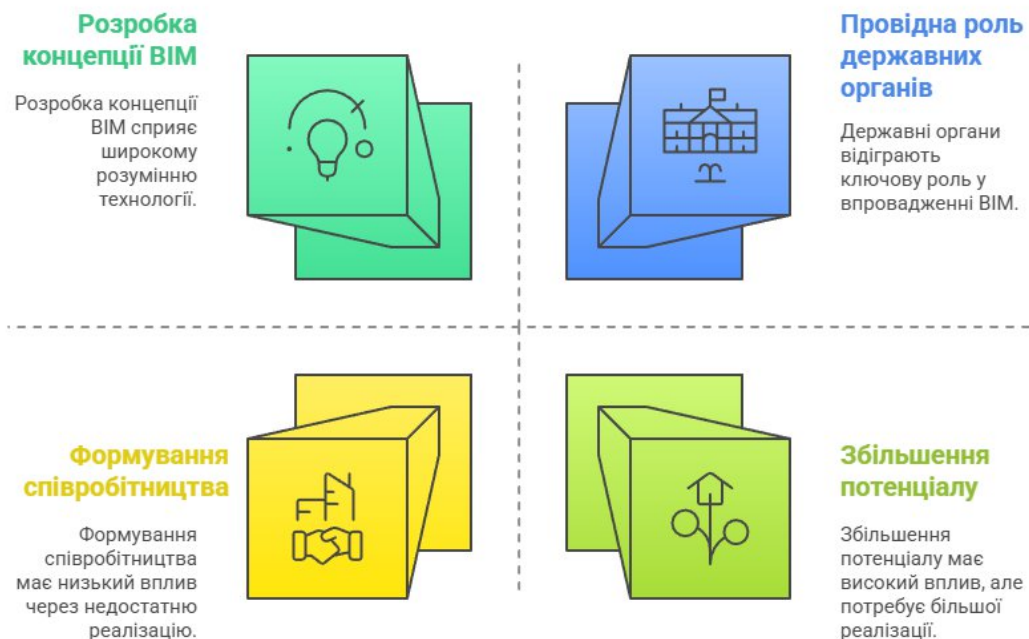


Рис.6.7. Стратегічні напрями для впровадження BIM
(розроблено автором на основі [345])

Впровадження інформаційного моделювання будівель (BIM) уявляє собою комплексний процес управління змінами, який вимагає чітко сформульованих цілей, наявності ресурсів, кваліфікованих кадрів, належної організації змін, постійної мотивації, відчутного прогресу та достатнього часу на реалізацію. Для гармонізації зазначених елементів необхідна стратегічна основа, яка визначає ефективне впровадження BIM-технологій через розробку дієвих програм. Така стратегічна основа охоплює чотири ключові напрями діяльності, що безпосередньо пов'язані з реалізацією BIM-ініціатив:

- забезпечення провідної ролі державних органів;
- розробка і популяризація концепції BIM серед широкого загалу;
- формування структури співробітництва між учасниками процесу;
- збільшення потенціалу будівельного сектора.

Кожна з ключових сфер має охоплювати конкретні заходи, що враховують інтереси всіх учасників процесу публічних закупівель. Чітке визначення цих чотирьох стратегічних напрямків, а також їх рівномірний і паралельний розвиток, сприяють досягненню максимальної ефективності та надійності програм, у яких державні органи відіграють провідну роль [345]. Детальний опис основних заходів у межах кожного зі стратегічних напрямків представлено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2.

Чотири основні стратегічні напрямки введення BIM
(розроблено автором на основі [93])

Стратегічний напрямок	Зміст та ключові заходи
Забезпечення провідної ролі державних органів	Формування державної політики у сфері цифровізації будівництва; розробка нормативно-правової бази для застосування BIM; створення централізованої системи управління BIM-проектами; стимулювання участі державних замовників у впровадженні цифрових технологій.
Розробка і популяризація концепції BIM серед широкого загалу	Проведення інформаційних кампаній, семінарів і навчальних програм; створення відкритих ресурсів та методичних рекомендацій; формування суспільного розуміння переваг BIM-технологій у підвищенні ефективності проектів.
Формування структури співробітництва між учасниками процесу	Розвиток міжвідомчої координації між державними, науковими та приватними структурами; створення платформ для обміну даними; впровадження єдиних стандартів взаємодії між проектними, будівельними та експлуатаційними організаціями.
Збільшення потенціалу будівельного сектора	Підвищення кваліфікації фахівців; стимулювання інвестицій у дослідження та інновації; створення центрів компетенцій BIM; підтримка малого та середнього бізнесу у переході до цифрових технологій.

Для системної оцінки узгодженості чотирьох стратегічних напрямків упровадження BIM доцільно подати їх взаємодію у вигляді інтегральної моделі. Вона демонструє, як управлінські, організаційні та ресурсні компоненти впливають на результативність цифрової трансформації галузі. Формула узагальнює залежність ефективності

впровадження BIM від збалансованості всіх напрямів і дає можливість формалізовано описати їхній внесок.

$$E_{BIM} = \left(\delta \times B_{gow}^{v_1} + \gamma \times W_{pop}^{v_2} + \varphi \times P_{coop}^{v_3} + \omega \times T_{cap}^{v_4} \right) \times \left(1 - \frac{\alpha_{\Delta}}{\alpha_{max}} \right), \quad (6.8)$$

де: E_{BIM} — інтегральний показник ефективності впровадження BIM; $B_{gow}^{v_1}$ — рівень залучення державних органів; $W_{pop}^{v_2}$ — суспільна обізнаність щодо BIM; $P_{coop}^{v_3}$ — розвиненість міжсекторальної взаємодії; $T_{cap}^{v_4}$ — кадровий та технологічний потенціал галузі; $\delta, \gamma, \varphi, \omega$ — вагові коефіцієнти; v_1, v_2, v_3, v_4 — експоненти еластичності; α_{Δ} — дисбаланс між напрямками; α_{max} — гранично допустима варіація системи.

Формула показує: чим рівномірніше розвиваються стратегічні напрями та чим вищі їхні інтегральні значення, тим більшу ефективність демонструє сектор у процесі переходу до BIM-технологій [198].

Розглянемо досвід країн Європейського Союзу. Технологія BIM, яка здобула широке визнання у більшості розвинених держав, рекомендована як ефективний інструмент для проведення публічних закупівель згідно з Директивою PEiR 2014/24/ЄС. Крім того, концепція BIM гармонійно вписується в європейську стратегію підтримки інновацій та стимулювання економіки, спрямовану на забезпечення довгострокової ефективності публічних інвестицій. У таблиці 6.3 наведено основні фактори, через які державні органи відіграють ключову роль у впровадженні BIM в процеси публічних закупівель країн ЄС.

Таблиця 6.3.

Фактори, що обумовлюють провідну роль державних органів у впровадженні технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) у процесах публічних закупівель країн Європейського Союзу (розроблено автором на основі [198])

<i>Фактор</i>	<i>Зміст та характеристика впливу</i>
Нормативно-правова підтримка	Прийняття директив та національних стандартів, що регламентують використання BIM у державних замовленнях; закріплення вимог до цифрових моделей у тендерній документації.
Інституційне лідерство	Активна роль урядових структур у розробці дорожніх карт упровадження BIM; створення державних агенцій або координаційних центрів з питань цифрового будівництва.
Фінансове стимулювання	Виділення грантів та субсидій для підприємств, що впроваджують BIM; надання податкових пільг або преференцій у державних закупівлях для компаній, які використовують цифрові технології.
Освітні та кадрові ініціативи	Підтримка навчальних програм, підвищення кваліфікації спеціалістів, інтеграція BIM-курсів у систему професійної освіти; формування спільнот практиків.
Інноваційна політика ЄС	Відповідність упровадження BIM загальноєвропейським пріоритетам розвитку цифрової економіки, енергоефективності та сталого будівництва; підтримка інновацій через програми Horizon Europe.
Прозорість і	Використання BIM для підвищення відкритості процесів закупівель,

підзвітність публічних закупівель	покращення контролю за витратами, запобігання корупційним ризикам і забезпечення якості державних інвестицій.

Для створення надійної основи для подальшого впровадження ВІМ в Україні, розпочаток процесу його інтеграції в систему публічних закупівель потребує залучення значної кількості активних учасників, зокрема осіб, які приймають рішення, та зацікавлених сторін.

Ключові завдання, що мають бути виконані до початку або паралельно з імплементацією ВІМ у публічних закупівлях, включають такі аспекти:

1. Підвищення рівня обізнаності серед політичних діячів і представників влади. Найважливіше завдання — забезпечити розуміння посадовими особами потенційних переваг, які ВІМ може принести державному бюджету, а також його впливу на зростання конкурентоспроможності економіки. ВІМ відкриває значні перспективи для розвитку передових технологій у науковій сфері та промисловості, зокрема у забезпеченні ефективного управління життєвим циклом будівельних об'єктів, енергоефективності та громадської безпеки [208].

Для оцінювання готовності державного сектору до масштабного впровадження ВІМ у сфері публічних закупівель доцільно подати сукупний вплив ключових чинників у вигляді узагальненої аналітичної моделі. Така формалізація дозволяє відобразити взаємозалежність нормативної, фінансової, інституційної та освітньої складової, що визначають успішність імплементації технології за європейським зразком. Формула інтегрує основні фактори, окреслені у практиці ЄС, та показує, як їх збалансованість впливає на готовність системи до переходу на ВІМ.

$$H_{BIM-EU} = (A^{g_1} \times S^{g_2} \times N^{g_3} \times R^{g_4} \times E^{g_5} \times K^{g_6})^{\frac{1}{\sum_{i=1}^6 g_i}} \times (1 - \gamma_{\Delta}), \quad (6.9)$$

де: H_{BIM-EU} — інтегральний показник готовності державного сектору до впровадження ВІМ у публічні закупівлі за моделлю ЄС, A — нормативно-правова підтримка та ступінь відповідності директивам (наприклад, 2014/24/ЄС), S — інституційне лідерство та організаційна спроможність державних структур, N — рівень фінансових стимулів, включаючи гранти, субсидії та податкові преференції, R — освітні та кадрові ініціативи, що формують професійний потенціал, E — інноваційна політика та відповідність європейським програмам розвитку цифрової економіки, K — рівень прозорості та підзвітності процесів закупівель, g_i — вагові коефіцієнти значущості кожного з факторів, γ_{Δ} — поправка на системний дисбаланс, що відображає відхилення фактичних показників від нормативної європейської траєкторії.

Модель демонструє, що готовність до впровадження ВІМ зростає тоді, коли всі ключові чинники розвиваються узгоджено, а їхній комбінований ефект формує стійку основу для модернізації системи публічних закупівель за європейськими стандартами.

Для представників приватного сектору, які вже використовують цифрові процеси і технології, переваги ВІМ є очевидними. Серед них — покращена координація, прискорений обмін точною та надійною інформацією, що сприяє прийняттю більш обґрунтованих рішень і покращенню якості результатів. У державному секторі ці переваги проявляються у вигляді економічних здобутків — оптимізації використання державних

інвестицій на етапі реалізації проєктів та підвищення якості споживання суспільних благ і послуг під час експлуатації будівельних об'єктів [273].

Завпровадження BIM на загальнодержавному рівні може значно підвищити продуктивність будівельного сектора. Це дозволить консолідувати економічні ефекти національного масштабу та забезпечить підтримку більш високих темпів продуктивності й економічного зростання країни.

Окрім економічних переваг, BIM може також сприяти екологічним здобуткам. Завдяки точнішому використанню матеріалів зменшується кількість відходів, а моделювання і аналіз енергоспоживання допомагають ефективніше використовувати енергію, знижуючи її витрати. Власники громадської інфраструктури мають можливість отримати соціальні вигоди завдяки застосуванню BIM під час планування та консультацій у державному секторі, що сприятиме розвитку нової або модернізованої інфраструктури. Така участь забезпечує створення продуманої інфраструктури, яка відповідає потребам громади, дозволяючи досягти кращих соціальних результатів: від оптимального використання ресурсів і зростання доступності громадських об'єктів до виявлення та збереження історико-архітектурної спадщини. Таким чином, BIM надає державному сектору економічні, екологічні та соціальні переваги.

2. Другим ключовим завданням є навчання персоналу новим навичкам. Держава повинна через систему освіти мотивувати фахівців опановувати сучасні підходи, наприклад, управління будівельними процесами чи ефективне управління енергоресурсами. Не менш важливо навчитися формувати позитивні відносини на основі співпраці та обміну знаннями.

3. Ще один важливий аспект — активна взаємодія між замовниками і підрядниками. Впровадження новітніх технологій потребує освітніх ініціатив і спільного обміну досвідом. На початкових етапах пілотні проєкти слугують цінним джерелом практичних знань, дозволяючи як замовникам, так і підрядникам ефективно адаптуватися до використання інновацій [133].

Для комплексного оцінювання системного впливу BIM на державний сектор доцільно подати взаємозв'язок економічних, екологічних, соціальних та організаційних вигод у вигляді узагальненої моделі. Формула інтегрує ключові напрями впливу BIM і демонструє їхній комбінований внесок у підвищення продуктивності та якості державного управління.

$$H_{BIM-Impact} = \left[\left(D_{econ}^{c1} \times D_{ecol}^{c2} \times D_{soc}^{c3} \right) \times \left(V_{skill}^{c4} \times L_{collab}^{c5} \right) \right]^{\frac{1}{\sum_{i=1}^5 c_i}} \times (1 - \theta_{\Delta}), \quad (6.10)$$

де: $H_{BIM-Impact}$ — інтегральний показник сукупного впливу BIM на державний сектор, D_{econ}^{c1} — економічні ефекти (оптимізація інвестицій, підвищення продуктивності, національні економічні вигоди), D_{ecol}^{c2} — екологічні ефекти (зменшення відходів, ефективне енергоспоживання), D_{soc}^{c3} — соціальні ефекти (підвищення якості громадських благ, розвиток інфраструктури, збереження спадщини), V_{skill}^{c4} — рівень підготовки кадрів та освоєння нових компетенцій, L_{collab}^{c5} — інтенсивність взаємодії між замовниками та підрядниками, включно з обміном досвідом у межах пілотних проєктів, c_i — вагові

коефіцієнти значущості кожної групи чинників, θ_{Δ} — поправка на асиметрію розвитку факторів, що відображає наявність дисбалансів у системі.

Модель показує, що максимальний ефект від впровадження BIM досягається лише тоді, коли економічні, екологічні та соціальні вигоди доповнюються якісною підготовкою кадрів і ефективною співпрацею учасників проєктів.

4. Додатково необхідно заохочувати включення українських фахівців до європейських організацій, які займаються впровадженням BIM-технологій. Відставання України у цій сфері є очевидним, тоді як у передових країнах уже діють принципи раціонального використання державних ресурсів і критерії інвестиційного планування, орієнтовані на довгострокові оцінки витрат протягом усього життєвого циклу об'єктів будівництва.

5. Ще одним кроком має стати створення спеціальної установи, відповідальної за організацію та координацію питань, пов'язаних із впровадженням BIM. Цей орган повинен керувати процесом змін, сприяти міжнародній співпраці та акумулювати досвід інших країн з подібних впроваджень [212].

Процес упровадження технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) у публічних закупівлях України вимагає системного підходу та узгоджених дій державних органів. Визначення основних завдань дозволяє забезпечити ефективне управління цифровими змінами, підвищити прозорість процедур і створити нормативно-методичну основу для їх реалізації. На рисунку 6.8 подано ключові завдання, вирішення яких є необхідною умовою для впровадження BIM у сфері публічних закупівель.

1. Перший формальний крок для інтеграції BIM в Україні передбачає створення спеціальної організації при Міністерстві розвитку громад, територій та інфраструктури України. Ця структура повинна функціонувати за підтримки галузевих експертів і наукових установ, взявши на себе відповідальність за організацію та координацію заходів, пов'язаних з впровадженням BIM. Подальші етапи реалізації цієї ініціативи має координувати, контролювати та регулювати саме цей новостворений орган.

2. Розробка проєктів законодавчих змін. Організація, яка об'єднує експертів у сферах управління будівельними проєктами, публічних закупівель і насамперед фахівців-практиків BIM, повинна сконцентруватися на створенні базових проєктів законодавства. Обов'язковим є формування чіткого офіційного графіка впровадження BIM.

На цьому етапі також слід розробити план і стратегію комунікації, спрямовану на задоволення потреб і врахування очікувань усіх зацікавлених сторін. Комунікаційна стратегія відіграє ключову роль у залученні конкретних груп учасників процесу. Вона повинна включати визначення мети комунікації, розробку адекватних методів і каналів передачі інформації, уточнення обсягу необхідних даних для кожної групи зацікавлених осіб, а також визначення відповідальних осіб за інформування.

Ефективне управління зворотнім зв'язком на всіх етапах реалізації та рівнях взаємодії є основою для продуктивної комунікації. Це сприяє формуванню відкритого діалогу, взаєморозуміння і, як результат, досягненню співпраці та створенню компромісних рішень, які будуть прийнятними для всіх учасників процесу. Подібний підхід є запорукою успішного впровадження BIM [97].

3. Розробка стандартів і норм. Для реалізації нових процесів необхідно створити публічну базу знань і зареєструвати стандарти, співвідносні з міжнародними та

європейськими нормами. Нова нормативно-правова база повинна охоплювати такі напрями:

- стандарти ефективного використання BIM у будівельних процесах;
- оцінка ефективності інвестицій;
- стандарти реалізації BIM в організаціях, що беруть участь у виконанні проєктів.



Рис. 6.8. Завдання, які необхідно вирішити для впровадження BIM у сфері публічних закупівель (розроблено автором на основі [97])

4. Вибір потенційних пілотних проєктів, зокрема інфраструктурних (4-5 проєктів), включає кілька ключових етапів. Це визначення цілей впровадження методології BIM з встановленням основних заходів для досягнення цих цілей; підбір необхідних стандартів для пілотів; проведення технічної оцінки кожного проєкту; реалізація додаткових досліджень і контроль якості виконання від старту до введення в експлуатацію; оцінка отриманих результатів і їх порівняння з поточними проєктами; дослідження на предмет доцільності ширшого застосування BIM в Україні; а також перегляд створених стандартів у випадку виявлених недоліків чи невідповідностей.

Для відображення логіки стартової інтеграції BIM доцільно подати її як керований процес, у якому окремі компоненти не просто підсумовуються, а взаємно підсилюють одна одну. Така формалізація дозволяє врахувати як прямий вплив інституцій, законодавства, стандартів і комунікацій, так і синергію між ними, а також роль зворотного зв'язку та результатів пілотних проєктів. Нижче подано формулу, що відображає цю багатofакторну структуру.

$$R_{BIM-Start} = \left(\sum_i^4 v_i Y_i + \sum_{1 \leq j < i \leq 4} h_{ij} Y_i Y_j \right) \times \left(1 - e^{-\rho P_{fn}} \right) \times \left(1 - \frac{\delta_b^2}{\delta_{crit}^2} \right), \quad (6.11)$$

де: $R_{BIM-Start}$ — інтегральний індекс готовності до стартового етапу; $Y_i Y_j$ — нормовані показники ключових чинників впровадження BIM; v_i — вагові коефіцієнти важливості; h_{ij} — коефіцієнти синергії між чинниками; P_{fn} — індекс зрілості механізмів зворотного зв'язку; ρ — параметр чутливості комунікаційної складової; δ_b^2 — дисперсія результатів пілотних проєктів; δ_{crit}^2 — максимально допустима дисперсія системи.

Формула показує, що навіть високі значення окремих компонент (інституцій, законодавства, стандартів, комунікацій) не гарантують успіху без двох додаткових умов: налагодженого зворотного зв'язку та стабільних, відтворюваних результатів пілотних проєктів [92].

5. Належний нагляд за пілотними проєктами є критично важливим. Ці проєкти повинні отримати максимальну підтримку, зокрема експертну, оскільки саме від їх успішної реалізації залежить перспектива впровадження концепції BIM у сфері державних закупівель. Першочергово важливо залучати як національних спеціалістів, так і зовнішніх консультантів до складу уже діючих організацій.

6. Рішення щодо обов'язкового використання методології BIM в публічних закупівлях має прийматися лише після отримання позитивних результатів від експериментальних проєктів. Незалежно від моделі впровадження (з централізованим управлінням або без нього), ця технологія поступово займатиме своє місце на будівельному ринку України.

7. Контроль за впровадженням змін на рівні галузевих підприємств також потребує ретельного моніторингу. Щоб забезпечити безпечний та ефективний перехід, як замовники, так і підрядники мають отримати необхідну підтримку, включаючи доступ до фінансування для розвитку сучасних технологій [140].

Вважається, що процес інтеграції методології BIM у систему державних закупівель повинен здійснюватися поетапно, відповідно до розробленої стратегії та представлених етапів на рисунку 6.9.

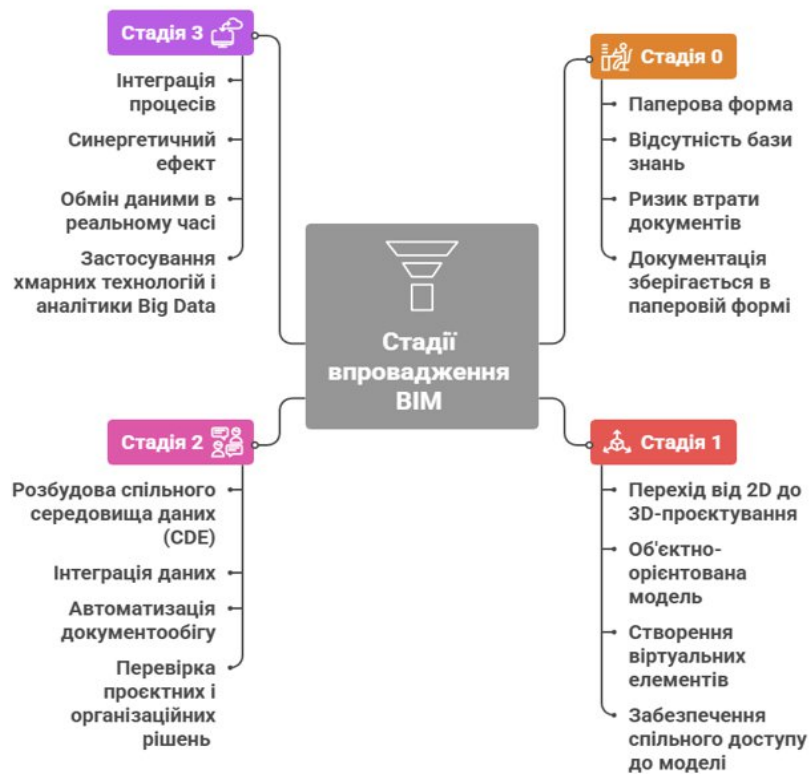


Рис. 6.9. Етапи реалізації концепції BIM у сфері публічних закупівель
(розроблено автором на основі [140])

Успішне впровадження нових рішень значною мірою залежить від ефективної комунікації із зацікавленими сторонами та продуктивного діалогу із суспільством. Ключовим моментом є чітке розуміння цілей, сфери діяльності та забезпечення єдиного бачення серед усіх залучених сторін. Різноманітність їхніх очікувань та потреб формує вимоги до змісту, способів передавання й отримання інформації, включаючи зворотний зв'язок, збір релевантних даних і врахування позицій різних груп. У зв'язку з цим, ще на етапі підготовки та планування впровадження BIM-систем необхідно створити комунікаційну стратегію. Ця стратегія має містити чітку постановку цілей, визначення відповідних інструментів та каналів комунікації, обсягу інформації, а також закріплення відповідальних осіб за її надання.

Для відображення узгодженості пілотних проєктів, контролю змін та ефективності комунікацій подамо їхню взаємодію у вигляді формули. Такий підхід лаконічно демонструє, як поєднання цих елементів формує загальну готовність системи до впровадження BIM.

$$D_{BIM} = \frac{(R \times C^{\delta} + P \times N^{\theta})}{1 + \beta V} \times \left(\varphi_{comm} + \sum_{i < j} G_i^a G_j^b \right), \quad (6.12)$$

де: D_{BIM} — інтегральний показник готовності до широкого впровадження BIM, R — результативність пілотних проєктів, C — рівень експертної підтримки, P — якість контролю впровадження змін, N — ступінь готовності організацій до переходу, V — ризику дестабілізації процесу (фінансові, організаційні), β — коефіцієнт чутливості

показника до ризиків, φ_{comm} — інтенсивність комунікацій та зворотного зв'язку, $G_i^a G_j^b$ — нормовані чинники, що описують взаємодії (синергійні зв'язки), δ, a, b, θ — параметри еластичності.

Формула показує, що готовність зростає за умов сильних пілотів, належного контролю, підтримки та активних комунікацій, але знижується зі збільшенням ризиків [182].

Вибір оптимальних інструментів та підходів для впровадження BIM сприяє налагодженню конструктивної взаємодії із зацікавленими сторонами, створенню позитивного іміджу проєкту та, врешті-решт, успіху всього процесу імплементації. Ініціативу щодо впровадження BIM у сфері будівництва при організації публічних закупівель можна розглядати як окремий проєкт. У цьому контексті ризики проєкту — це потенційні події, що можуть негативно вплинути на його виконання, зокрема: перевищення бюджету, затримка термінів реалізації або зниження якості кінцевого продукту.

Особливу увагу слід приділити виявленню ризиків і точному визначенню очікувань, потреб та проблем кожної групи зацікавлених сторін. Управління ризиками включає кілька основних етапів: ідентифікацію загроз, оцінювання ймовірності їх виникнення і потенційного впливу, розробку планів дій для протидії цим загрозам і подальшу реалізацію запланованих заходів. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти ризики та мінімізувати їхній вплив на проєкт. Відтак, при плануванні впровадження BIM має бути розроблена чітка процедура управління ризиками, яка стане невід'ємною частиною загальної стратегії.

Ризики класифікуються на основі того, хто є власником джерела ризику, що дозволяє ефективніше розпізнавати відповідальні області та осіб, залучених до їх управління й зниження. Пропонується така структура категорій ризиків:

1. Політичні. До цієї категорії належать ризики, спричинені політичними змінами в країні, зокрема зміною уряду чи кадрових рішень.
2. Правові або нормативні. Ризики, пов'язані із зовнішнім середовищем, яке не перебуває під контролем проєкту, такими як зміни в законодавстві чи стратегічні аспекти, що впливають на державну безпеку [294].
3. Економічні, зокрема фінансові. Це ризики зовнішнього характеру, наприклад, затримки або брак фінансування, інфляція, зміна процентних ставок чи інші ринкові фактори, що можуть вплинути на реалізацію проєкту.

Рациональний вибір інструментів для впровадження BIM та чітке управління ризиками визначають стійкість і передбачуваність усього процесу імплементації. Оскільки ініціатива розглядається як окремий проєкт, важливо формалізувати залежність між ризиками різних категорій, їхньою інтенсивністю та впливом на результат. Наведена формула дозволяє відобразити сукупну дію політичних, правових та економічних ризиків і їхню взаємодію.

$$M_{tot} = \left(cM_{pol}^{\delta} + bM_{law}^{\omega} + eM_{eco}^{\varphi} \right) \times \left(1 + \sum_{i < j} K_{ij} X_i X_j \right) \times (1 - \sigma I), \quad (6.13)$$

де: M_{tot} — зведений індекс загального ризику впровадження ВІМ, M_{pol}^{δ} — політичні ризики, M_{law}^{ω} — правові та нормативні ризики, M_{eco}^{φ} — економічні та фінансові ризики, c, b, e — вагові коефіцієнти значущості відповідних ризикових груп, δ, ω, φ — параметри еластичності, що визначають силу впливу кожної категорії ризиків, $X_i X_j$ — синергійна взаємодія окремих чинників ризику, K_{ij} — коефіцієнти взаємного підсилення ризиків, Π — ефективність застосованих заходів управління ризиками, σ — коефіцієнт впливу системи ризик-менеджменту на зниження сукупного ризику.

Формула підкреслює, що загальний ризик зростає не лише від окремих категорій загроз, а й від їх взаємного підсилення, тоді як якісне управління ризиками суттєво зменшує негативний ефект.

4. Організаційні або управлінські, включаючи людський фактор. До цієї категорії відносяться ризики в управлінні проектами, які стосуються планування, моніторингу, контролю чи прийняття рішень. Вони також включають управлінські аспекти організацій, залучених до проекту, що можуть впливати на його реалізацію. Це можуть бути проблеми управління змінами в організації, комунікація, забезпечення бізнес-процесів, наявність кваліфікованих кадрів чи міжособистісні конфлікти.

5. Технічні. Ризики технічного характеру охоплюють такі аспекти, як технічні несправності програмного забезпечення, невідповідність стандартів даних або форматів тощо. Ця класифікація сприяє структурованому підходу до аналізу ризиків та розподілу зон відповідальності за їх контроль [149].

Рисунок 6.10 систематизує основні групи ризиків, що виникають під час впровадження ВІМ у проектній та будівельній діяльності. Він наочно демонструє, як політичні, правові, економічні, організаційні та технічні чинники формують загальний ризиковий профіль проекту. Така класифікація дозволяє своєчасно визначати потенційні загрози та вибудовувати ефективні стратегії їхнього управління.

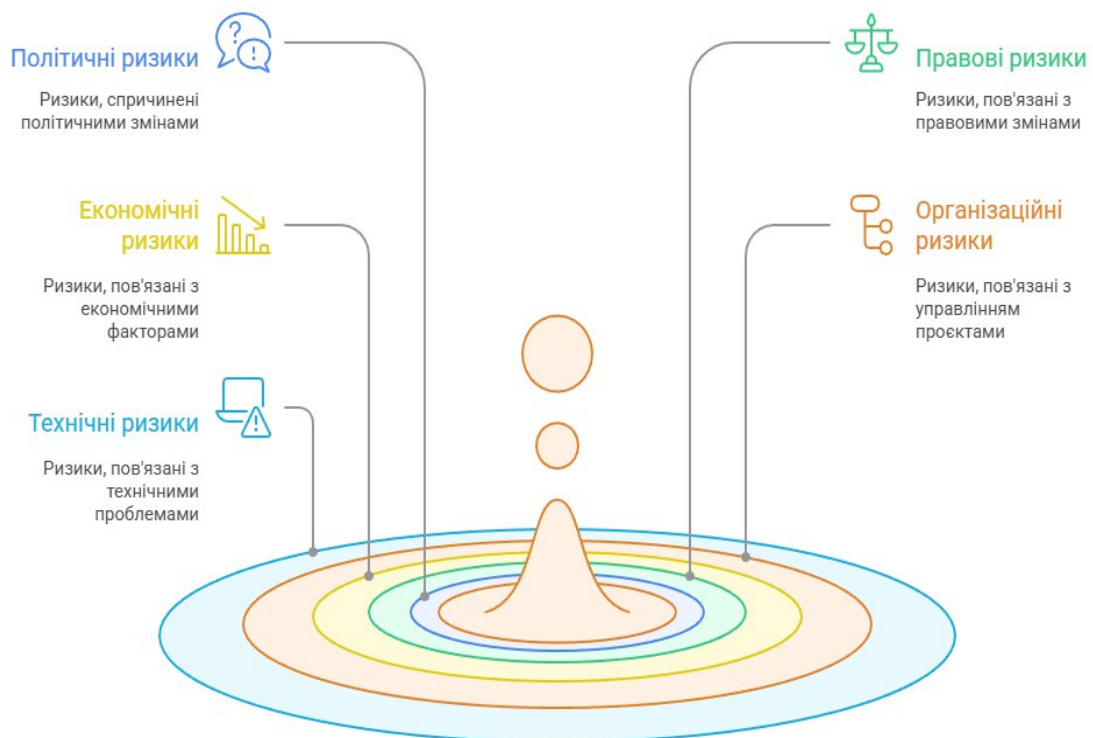


Рис. 6.10. Класифікація ризиків під час ведення проекту
(розроблено автором на основі [149])

Упровадження методології інформаційного моделювання будівель (BIM) являє собою складний процес, що вимагає ретельного проєктування, інтеграції наявних знань, аналізу ресурсів і окреслення відповідних цілей та часових рамок. Усі зазначені складові вимагають ідентифікації проблемних аспектів, розробки планів дій, поступового виконання завдань і, найважливіше, подолання існуючих бар'єрів. Відправною точкою для такого впровадження може бути адаптація моделі, що успішно застосовується в країнах Європейського Союзу. Ці країни досягли значного прогресу в імплементації BIM як інструменту для підвищення ефективності управління державними закупівлями.

Беручи до уваги європейський досвід, доцільним є створення органу або установи, відповідального за організацію послідовного і систематичного впровадження інформаційних технологій у сферу публічних закупівель. З огляду на це, можна виділити основні етапи реалізації методології BIM у рамках державного сектору:

1. Заснування спеціалізованого органу, який відповідатиме за організацію та координацію заходів, що стосуються впровадження BIM.
2. Проведення підготовчого етапу, який включає планування всього процесу.
3. Розроблення пропозицій щодо впровадження принципів і стандартів для використання методології BIM: - проведення консультацій із залученими сторонами шляхом активного діалогу; - формулювання цільових стандартів і принципів для застосування BIM у межах пілотних проєктів.
4. Реалізація затверджених рішень у пілотних проєктах з подальшим аналізом, моніторингом та збором даних щодо їх впливу.
5. Оцінка результативності впроваджених заходів і ухвалення рішень щодо доцільності подальшого використання BIM у сфері державних закупівель [186].

Імплементація методології BIM у публічних закупівлях має базуватися на ретельно спланованих і послідовно впроваджених етапах, які враховують кращі практики та стандарти міжнародного досвіду.

Рисунок 6.11 послідовне виконання організаційних, підготовчих та технічних дій формує керований цикл, що забезпечує узгоджений розвиток усіх компонентів реформи. Така структура дозволяє забезпечити прозорість процесу і підвищити ефективність інтеграції BIM на державному рівні.

Рисунок представляє замкнений цикл із п'яти ключових етапів: створення спеціалізованого органу, підготовчі роботи, розроблення пропозицій, реалізація пілотних проєктів та оцінка результативності. Кожен етап логічно пов'язаний із наступним, формуючи безперервний процес удосконалення та нарощування компетенцій. Така структурована модель підкреслює необхідність системності та зворотного зв'язку при впровадженні BIM у публічні закупівлі.



Рис. 6.11. Цикл впровадження BIM у публічних закупівлях
(розроблено автором на основі [186])

Подальше опрацювання ризиків у контексті впровадження BIM передбачає не лише фіксацію проблемних зон, а й формування системи превентивних заходів, здатних зменшити імовірність негативних сценаріїв. Важливо забезпечити прозорість процесів і формування єдиного інформаційного середовища, у межах якого всі учасники зможуть своєчасно отримувати актуальні дані та оцінювати ступінь прогресу. Наявність чітких процедур обміну інформацією, контролю версій та регламентації відповідальності є ключовими чинниками мінімізації операційних ризиків [190].

Суттєвого значення набуває також розбудова інституційної спроможності органів публічного сектору, оскільки саме їх працездатність визначає ефективність впровадження BIM на макrorівні. Це включає підготовку персоналу, створення нормативної бази, адаптацію процедур закупівель та узгодження технічних вимог до проєктної документації. Інвестування в підвищення компетентності фахівців — один із найефективніших способів зменшення організаційних та технічних ризиків.

Важливо враховувати, що кожен тип ризику здатен проявлятися з різною інтенсивністю залежно від стадії впровадження. На початкових етапах домінують політичні та нормативні ризики, тоді як під час реалізації пілотних проєктів зростає частка організаційних та технічних. З огляду на це доцільним є застосування адаптивної системи

управління ризиками, яка дозволяє коригувати інструменти реагування у відповідь на зміну зовнішніх та внутрішніх умов [19].

Удосконалення ризик-менеджменту також передбачає розроблення механізмів інституційного контролю за виконанням вимог ВІМ та впровадженням стандартів даних. Це сприяє підвищенню порівнянності інформації між різними проєктами, зменшує кількість помилок і забезпечує можливість формування аналітичної бази для прийняття стратегічних рішень. В умовах публічних закупівель це набуває особливого значення, оскільки якість відкритих даних безпосередньо впливає на прозорість і конкурентність процедур.

Для відображення поетапного характеру впровадження ВІМ та змінної ролі ризиків на різних стадіях доцільно використати динамічну модель, у якій кожен етап циклу робить свій внесок у загальний результат. Формула поєднує ефективність етапів, профіль ризиків та інституційну спроможність, показуючи, як слабкі ланки й неврегульовані загрози зменшують підсумковий ефект впровадження.

$$C_{BIM} = \left(\prod_{a=1}^5 S_a^{v_a} \right) \times \exp \left(- \sum_{a=1}^5 \sum_k \delta_k f_k(a) P_k \right) \times (1 + \gamma M_{inst}), \quad (6.14)$$

де: S_a — результативність а-го етапу циклу (від створення органу до оцінки результатів), v_a — його ваговий коефіцієнт; P_k — інтенсивність г-го типу ризику (політичного, правового, економічного, організаційного, технічного), $f_k(a)$ — функція чутливості етапу k до цього ризику, δ_k — параметри сили їхнього впливу, M_{inst} — рівень інституційної спроможності, γ — коефіцієнт її підсилювального ефекту. Добуток за етапами відображає, що загальний результат визначається збалансованістю всього циклу, тоді як експоненційний множник задає накопичувальний «штраф» за ризики з урахуванням того, на яких стадіях вони домінують, а інституційна спроможність частково компенсує цей негативний вплив.

Загалом успішність імплементації ВІМ значною мірою залежить від здатності керувати не лише технічними аспектами, але й поведінковими, інституційними та стратегічними чинниками. Комплексне бачення ризиків та використання математичних моделей, подібних до формули, дозволяє глибше оцінити їхню взаємодію, визначити найбільш критичні зони та сформувати збалансований портфель заходів реагування. Такий підхід дає змогу забезпечити контрольованість процесу та створити передумови для сталого розвитку цифрових практик у будівельній галузі [19].

6.3. Оптимізація комунікаційних і знансєвих потоків у цифровій мережі проєктної взаємодії

Для визначення ключових елементів у соціальних мережах важливо враховувати структурну значимість окремих вузлів, зв'язки між ними, а також існування спільнот, де вузли взаємодіють активніше між собою, ніж із вузлами за межами таких підмножин. У контексті мережного аналізу найважливіші вузли займають центральні позиції в графі, тому що вони мають прямі або опосередковані зв'язки з більшістю інших вузлів. Визначення міри центральності дозволяє оцінити ступінь зв'язку конкретного вузла з його найближчим оточенням і визначити його роль та вплив у структурі мережі. Для виділення

спільнот у мережі застосовують методи кластеризації графів, які зазвичай базуються на обчисленні певних критеріїв оптимізації для розбиття графа на підмножини.

У процесі аналізу було розглянуто проєкт зведення житлового комплексу, що охоплює три багатоквартирні будинки загальною площею 6850 м². Комплекс розташований у місті Рівне. Будівництво стартувало в лютому 2019 року, а його завершення планується на вересень 2023 року. Загальний бюджет проєкту становить 75 мільйонів гривень.

У нашому дослідженні, спрямованому на визначення частоти та якості зв'язків, методом анкетування було зібрано дані від 34 учасників проєкту. Серед них були як окремі фізичні особи так і організації, чиї уповноважені особи займалися виконанням конкретних завдань (підрядники, будівельні компанії, проєктні бюро тощо). Ітеративний характер процесу будівництва передбачає постійні зміни й доопрацювання в проєкті, які є неминучими. У цьому контексті ефективна взаємодія між учасниками стає критично важливою, оскільки дозволяє скоротити час очікування чи простою, зменшити обсяги переробок, підвищити якість кінцевого результату та знизити витрати.

Розуміння позиції кожного учасника в мережі контактів допомагає краще оцінити їх відносну важливість і проаналізувати можливі відхилення від ролей, передбачених контрактами. Оскільки комунікація виступає основним механізмом будь-якої ітеративної взаємодії, першим етапом цього дослідження стала ідентифікація зв'язків між учасниками проєкту. Кожному з них необхідно було окреслити коло осіб, з ким він взаємодіє в рамках реалізації проєкту. Таке спілкування могло бути спрямоване на вирішення різноманітних проблем: уточнення обсягів будівельних робіт і строків їх виконання, усунення нестач конструктивних елементів, виправлення помилок у проєкті або внесення коректив у заплановані роботи.

У процесі реалізації проєкту найчастіше виникали такі проблеми:

1. Невідповідності у проєктній документації, що спричиняли конфлікти між різними видами будівельних робіт. Ці невідповідності можна поділити на дві основні категорії:

- У межах одного виду робіт, наприклад, у структурній чи архітектурній частинах, а також у системах кондиціонування й вентиляції, електропостачання, водопостачання і водовідведення.

- Між різними видами робіт, тобто між структурною та архітектурною частинами, між структурною частиною й системами МЕР, а також між архітектурною частиною і МЕР [358].

Для узагальнення структурних характеристик комунікаційної мережі доцільно використати формулу 1, яка поєднує ключові метрики центральності та відображає реальний внесок кожного учасника в мережеву взаємодію. Такий підхід дозволяє кількісно оцінити вплив окремих вузлів на стійкість і ефективність інформаційних потоків.

$$G(k) = \gamma N_{deg}^*(k) + \alpha N_{clo}^*(k) + \sigma N_{bet}^*(k), \quad (6.15)$$

де: $N_{deg}^*(k)$ – нормована ступенева центральність вузла v ; $N_{clo}^*(k)$ – нормована близькість (closeness centrality); $N_{bet}^*(k)$ – нормоване посередництво; $\gamma, \alpha, \sigma \geq 0$, $\gamma + \alpha + \sigma = 1$ – вагові коефіцієнти важливості кожної характеристики.

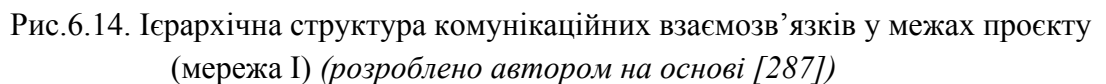
2. Помилки та недоліки на етапі проєктування мають різний ступінь впливу на успішність реалізації проєкту. Наприклад, незначні недоліки в кресленнях, як-от відсутність номерів ідентифікаторів, ліній чи розмірів, зазвичай викликають невеликі затримки в виконанні графіку робіт. Водночас, серйозніші прогалини, наприклад, недоотримання проєктної документації з деталізацією окремих конструктивних елементів, можуть стати причиною значних затримок у термінах реалізації та створювати додаткові фінансові навантаження.

3. На етапі будівництва часто виникають помилки, пов'язані з неякісним виконанням робіт. Такі проблеми можуть бути результатом використання матеріалів, які не відповідають вимогам і характеристикам, зазначеним у проєкті.

4. Брак ефективної співпраці між учасниками проєкту є ще однією поширеною проблемою. Цей фактор іноді стає складним для визначення, оскільки передумови до нього можуть перетинатися з іншими групами причин. Наприклад, багатьох помилок у проєктній документації, що призводять до конфліктів або розбіжностей, потенційно можна було б уникнути, якби учасники команди активно взаємодіяли ще на ранньому етапі проєктування [237].

У рамках цього дослідження під терміном «комунікація» розуміється обмін інформацією між учасниками проєкту за допомогою засобів зв'язку: телефонної розмови, електронної пошти чи безпосереднього вербального спілкування. Під час дослідження впливу комунікаційної інфраструктури на успішність реалізації проєкту було визначено три ключові етапи, які представлені на рисунках 6.11-6.13 в додатках А, Б, В.

Перший етап дослідження передбачав створення початкової моделі мережі зв'язків у вигляді матриці суміжності. У цій матриці значення 1 вказує на наявність комунікаційного зв'язку, а 0 означає його відсутність (додаток Г). Вона була розроблена на основі ієрархічної організаційної структури проєкту, враховуючи договори, укладені між учасниками проєкту, а також зібрані експертні думки щодо механізму співпраці та комунікації (надалі мережа І). Візуалізація цієї мережі, а також усіх наступних, була виконана з використанням бібліотеки Networkx мовою програмування Python. У вузлах мережі представлені учасники проєкту, а ребра символізують наявність зв'язків між ними. Розташування вузлів виконувалося за допомогою силового алгоритму Фрухтермана-Рейнгольда (Spring Layout) [287]. Цей алгоритм оперує вузлами як об'єктами з масою, а зв'язки трактує як пружини з відповідними силами (вагами), що діють у просторі. Гравітаційна модель застосовується для визначення відносних положень вузлів. Як результат, створюється мережева діаграма, що представлена на рисунку 6.14, де просторове розташування вузлів залежить від інтенсивності та кількості зв'язків між ними. Однією з ключових переваг такого підходу є те, що отримана схема є зрозумілою для інтерпретації завдяки зменшенню перекриття вузлів і зв'язків.



- проведення кластеризації (рис. 6.15),
- розрахунок показників для всієї мережі (табл.. 6.4),
- визначення основних мір центральності для вузлів (табл.. 6.5).

305

Середня довжина найкоротшого шляху в мережі становить 1,50, що свідчить про високий рівень ефективності комунікації та прийняття рішень. Це значення вказує на швидке поширення інформації, оскільки учасникам потрібно менше взаємозв'язків для спілкування.

Високий коефіцієнт кластеризації мережі I (0,712) викликає певне здивування, оскільки таке високе значення логічно передбачає можливість поділу мережі I на кілька кластерів. Наявність кластерів має свої переваги, адже всередині них відбувається основна частина взаємодій між учасниками, а комунікація здійснюється через коротші шляхи, що сприяє швидшій передачі інформації [247].

У додатку Г представлено таблицю 6.5, що демонструє результати розрахунку ключових метрик центральності для елементів мережі I. Наведені показники дають змогу проаналізувати структуру взаємозв'язків та визначити найвпливовіші вузли системи. На основі його аналізу можна сформулювати наступні висновки:

1. Найвищий рейтинг серед усіх розглянутих показників має учасник "Технічний нагляд за будівництвом", що пояснюється найбільшою кількістю зв'язків у мережі, яка становить 33. Ця високий рівень взаємодії вказує на його центральну роль у комунікаційній структурі проекту.

2. Для всіх оцінених метричних показників центральності перша десятка вузлів у рейтингу залишається незмінною. Незалежно від використаного методу оцінювання, позиція вузлів у агрегованому списку не змінюється. Це пов'язано з однорідністю оцінки зв'язків: всі мають однакову вагу, яка дорівнює одиниці, що забезпечує рівнозначність з'єднань між учасниками.

3. Значна частина комунікаційного навантаження, яка відповідає за інтенсивність взаємодій у мережі, сконцентрована на ключових учасниках: "Технічний нагляд за будівництвом", "Керівник проекту", "Начальник дільниці", "Виконроб (інженерні мережі)" та "Інженер-будівельник". Висока кількість зв'язків цих вузлів підкреслює їх важливість для підтримки життєдіяльності мережевої системи проекту [1].

Таким чином, результати аналізу мережевої структури стали підставою для прийняття рішення щодо подальшого дослідження організації взаємодій у межах будівельного проекту. Особлива увага буде приділена актуальному стану міжучасникової комунікації та уточненню вагових характеристик зв'язків для більш точного моделювання структурної динаміки мережі.

На другому етапі дослідження комунікаційних мереж, кожному зв'язку було призначено вагу ребра. У матриці суміжності первинні значення 1 були замінені на числові показники, що відображають вагу зв'язків. Цей параметр, аналогічно до методології Ргукє, визначався як функція двох основних змінних — частоти та якості комунікації. Інформація щодо зазначених змінних була зібрана за допомогою анкетування учасників проекту, а для подальшого аналізу застосовувалася шкала Лайкерта.

Частота комунікації оцінювалася за п'ятьма рівнями, із застосуванням 5-бальної шкали: менше одного разу на тиждень, один раз на тиждень, кілька разів на тиждень, один раз на день і більше одного разу на день, відповідно до градації від 1 до 5 балів. Оцінка якості комунікації була проведена на основі 3-бальної рейтингової шкали (низький, середній, високий рівень), яка враховувала три ключові показники: важливість, точність і своєчасність [369].

Таким чином, для визначення ваги зв'язку між вузлами а та b може бути використане наступне формулювання.

$$G_{ab} = B_{ab} \times J_{ab}, \quad (6.16)$$

де G_{ab} - частота комунікації, яка розраховується як $b_{ab}/5$, J_{ij} – якість комунікації, яка розраховується як $j_{ab}/9$.

Значення ваги вузла в мережі визначається як сума ваг усіх ребер (тобто "ваг зв'язків"), що з'єднують цей вузол.

Після створення комунікаційної структури мережі (мережі II), встановлення ваг для ребер зв'язків та підрахунку ваг вузлів, наступним кроком дослідження комунікаційної мережі проекту на етапі II було виконання таких завдань:

- обчислення показників мережі в цілому (табл. 6.6),
- визначення ключових мір центральності для окремих вузлів (табл 6.7),
- виконання кластеризації (рис. 10).

Таблиця 6.6.

Основні характеристики мережі I (розроблено автором на основі [323])

Показник	Значення
Інтегральна щільність мережевої структури	0,325
Середнє значення мінімальної довжини маршруту між вузлами	1,747
Середній показник кластеризації мережі	0,460

У зіставленні з результатами, отриманими для мережі I, слід відзначити зниження її структурної щільності та рівня кластеризації, а також зростання середньої довжини мінімальних шляхів. З огляду на характер комунікацій у будівельному проекті, такі зміни можна інтерпретувати як сприятливі [87].

Показники ключових центральностей для вузлів мережі II наведено на рисунках 6.16-6.20.

Аналізуючи центральність вузлів за ступенем (табл.6.7, що подана в додатку Д, та рис. 6.16,), можна відзначити, що вузли "Начальник дільниці" та "Технічний нагляд за будівництвом" мають високий ступінь центральності порівняно з іншими учасниками мережі. Низький рівень центральності вузла "Генпроектувальник" може пояснюватися відсутністю помилок у проектуванні, що, в свою чергу, знижує потребу у внесенні змін до проектної документації. Одночасно можна помітити високий рівень центральності вузлів "Виконроб (інженерні мережі)" та "Інженер-будівельник, ВТВ", оскільки їх основною відповідальністю було безпосереднє виконання робіт на об'єкті.

Доцільно відзначити, що найвищі значення ступеневої центральності демонструють саме ті вузли, які представляють керівний склад і володіють правом ухвалювати рішення у відповідних інженерних сферах. Це пов'язано з тим, що ступенева центральність визначається сумарною вагою зв'язків вузла. Відповідно, учасники проекту

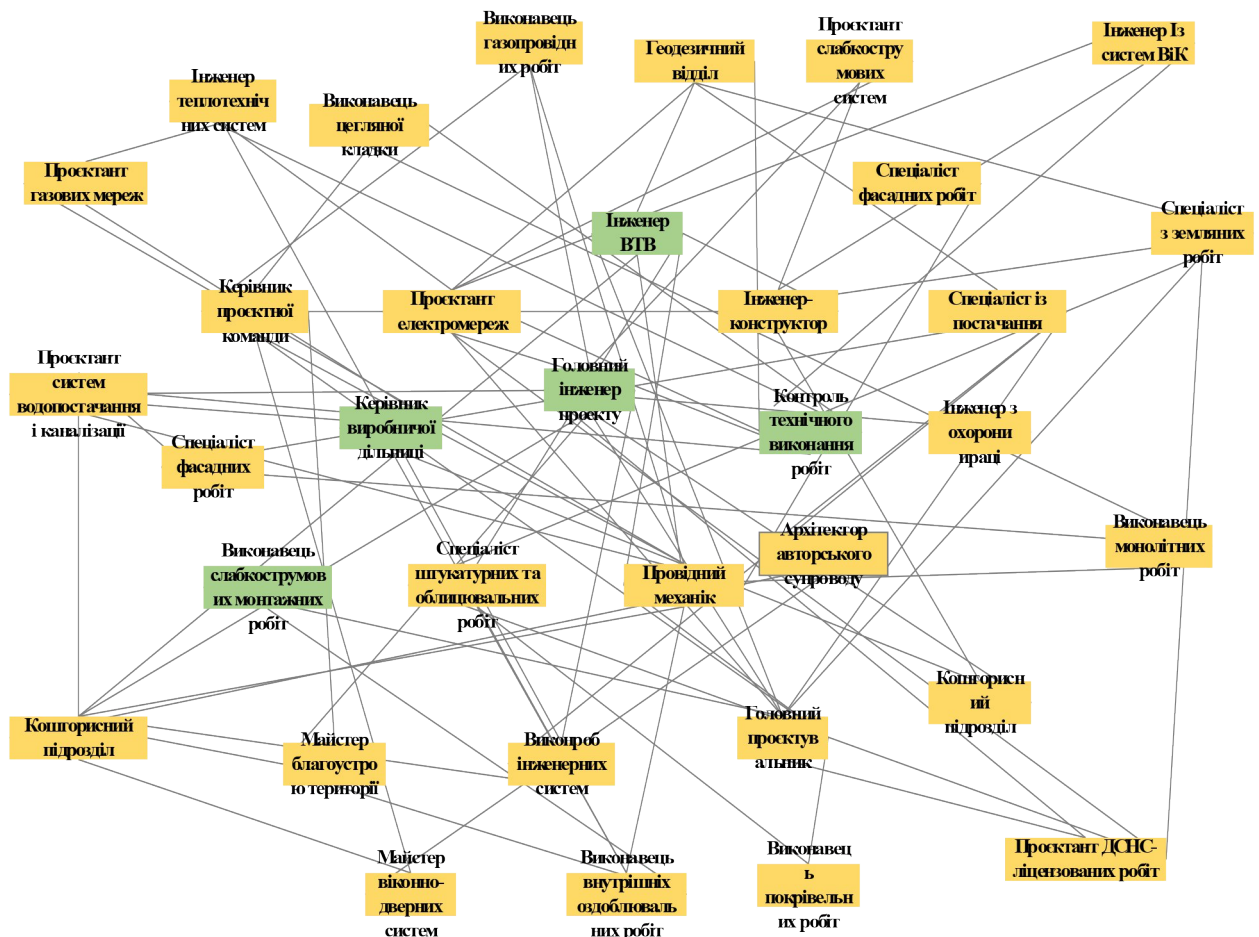


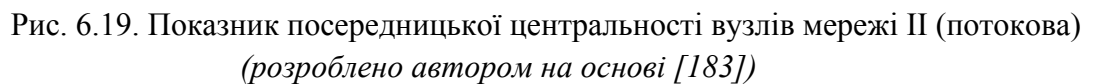
Рис. 6.17. Векторна центральність вузлів мережі ІІ
(розраховано автором на основі [366])

– вузли з великою кількістю сусідів, що мають низький рівень впливу в системі (наприклад, «Начальник дільниці» та «Технічний нагляд за будівництвом»);

– вузли з невеликою кількістю сусідів, але високим рівнем впливу (наприклад, «Виконроб (інженерні мережі)», «Інженер-будівельник ВТБ» та «Головний інженер»)

[131]. Подальшим розвитком концепції центральності за власним вектором є алгоритм оцінки центральності PageRank, представлений у графічній інтерпретації (рис. 6.18) та табличних даних.

Різниця між підходами полягає в тому, що алгоритм PageRank при визначенні міри вузла не враховує високий рівень престижності вузлів-сусідів. Це призводить до того, що вузли з високою центральністю за власним вектором, такі як «Виконроб (інженерні мережі)», «Інженер-будівельник, ВТБ» та «Головний інженер», мають нижчі показники центральності за PageRank. Водночас вузли, що мають більше сусідів із низьким рівнем впливу, як-от «Керівник проєкту» та «Менеджер з постачання», отримують вищі значення. На жаль, основна перевага алгоритму PageRank, яка забезпечила його успіх у сфері пошукових систем і ранжування веб-ресурсів, не завжди доречна для аналізу комунікаційної мережі в проєктному середовищі [183].



Центральність потоку за близькістю (рис.6.20) визначає важливість вузла шляхом розрахунку середньої довжини шляхів між ним та іншими учасниками мережі.

На основі проведених розрахунків мір центральності й аналізу отриманих результатів визначено, що у майбутніх дослідженнях найбільший пріоритет матиме оцінка

[illegible]

ап дослідження комунікаційної мережі проєкту передбачав виконання

2. Оптимізація мережі зв'язків з метою виділення споріднених спільнот. Для цього застосовано алгоритм оптимізаційної кластеризації Louvain, який належить до категорії алгоритмів машинного навчання без необхідності попереднього визначення кількості кластерів. Він ефективно функціонує на зважених неорієнтованих графах [21].

- показники центральності вузлів за ступенем та власним вектором (табл. 6.9);
- кластеризація мережі (рис. 6.21).

Порівняльні показники центральності ключових учасників мережі III (укладено автором)
(розроблено автором на основі [21])

Учасник	Центральність за ступенем	Учасник	Центральність за власним вектором
Керівник виробничої дільниці	276,85	ВІМ-менеджер	0,317
Керівник проекту	240,63	Керівник дільниці	0,314
Контроль технічного виконання робіт	235,74	Керівник проекту	0,295
Головний інженер	193,72	Технічний нагляд	0,263
Виконроб інженерних мереж	177,81	Головний інженер	0,249
Інженер виробничо-технічного відділу	170,88	Виконроб інженерних мереж	0,241
ВІМ-менеджер	168,92	Інженер ВТВ	0,215
Менеджер матеріально-технічного забезпечення	168,24	Менеджер з постачання	0,207
Інженер монолітних робіт	145,76	Головний механік	0,194
Головний механік	145,32	Спеціаліст покрівельних робіт	0,182
Геодезичний підрозділ	141,11	Виконавець монолітних робіт	0,171
Спеціаліст внутрішніх мереж ВіК	140,62	Геодезична служба	0,166
Майстер покрівельних робіт	132,94	Інженер мереж ВіК	0,161
Виконавець робіт з цегляної кладки	131,54	Виконавець цегляної кладки	0,154
Проектант ВіК	131,09	Майстер віконно-дверних конструкцій	0,155
Проектант газових мереж	130,71	Інженер-конструктор	0,152
Інженер-конструктор	128,51	Фахівець земляних робіт	0,151
Архітектор авторського супроводу	123,67	Монтажник газопостачальних мереж	0,139
Виконавець газових мереж	120,39	Інженер систем опалення та вентиляції	0,136
Інженер з охорони праці	119,38	Архітектор авторського нагляду	0,135
Спеціаліст зі слабкострумівих мереж	116,75	Інженер з ОП	0,134

Інженер систем опалення та вентиляції	111,92	Проектант газових мереж	0,131
Кошторисний підрозділ	110,56	Фахівець слабкострумових мереж	0,129
Проектант електромереж	107,84	Проектант ВіК	0,127
Фахівець земляних робіт	106,41	Кошторисний відділ	0,12
Спеціаліст віконно-дверних систем	106,03	Виконавець внутрішніх опоряджувальних робіт	0,108
Головний проектувальник	90,87	Проектант електричних мереж	0,101
Майстер штукатурних та облицювальних робіт	82,57	Майстер штукатурних робіт	0,099
Виконавець внутрішніх оздоблювальних робіт	82,13	Фахівець фасадних робіт	0,095
Проектант ліцензованих робіт ДСНС	79,85	Спеціаліст благоустрою	0,089
Проектант слабкострумових мереж	78,82	Головний проектувальник	0,086
Спеціаліст фасадних робіт	67,94	Проектант слабкострумових систем	0,077
Виконавець робіт благоустрою	59,98	Виконавець робіт з улаштування підлог	0,076
Спеціаліст робіт з улаштування підлог	53,81	Проектант ліцензованих робіт ДСНС	0,069
Виконавець ДСНС-ліцензованих робіт	53,47	Виконавець ДСНС-процедур	0,066

Для підвищення наочності дані в таблиці 5 упорядковано за спаданням значень показників «центральність за ступенем» та «центральність за власним вектором». Додавання до мережі нового елемента — «ВІМ-менеджера», який завдяки зв'язкам із найбільш впливовими учасниками отримує найвище значення власновекторної центральності (0,317), сприятиме перерозподілу комунікаційних потоків і зменшенню навантаження на ключові вузли.

Графічна інтерпретація структурних зв'язків мережі ІІІ відповідно до показників центральності представлена на рисунку 6.22.

Результати роботи оптимізаційного алгоритму представлені на рисунку 6.24.

Зелений кластер об'єднує ключових учасників, важливих для цієї мережі які виконують різні будівельні роботи. Присутність останніх пояснюється частими комунікаціями з підрядниками.

Синій кластер охоплює ключового учасника «Виконроб (інженерні мережі)» разом із підрядниками, які займаються інсталяцією різних інженерних мереж, оскільки з ним

На рисунку 6.23, поданому в додатку Е, представлено графічну ілюстрацію комунікаційних зв'язків мережі ІІІ, що відображає розподіл центральності її вузлів.

«ВІМ-менеджер» працює під керівництвом менеджера проєкту та відповідає за щоденну інтеграцію, узгодження й об'єднання роботи всіх проєктних дисциплін і ключових учасників відповідних кластерів з метою забезпечення досягнення цілей проєкту.

316

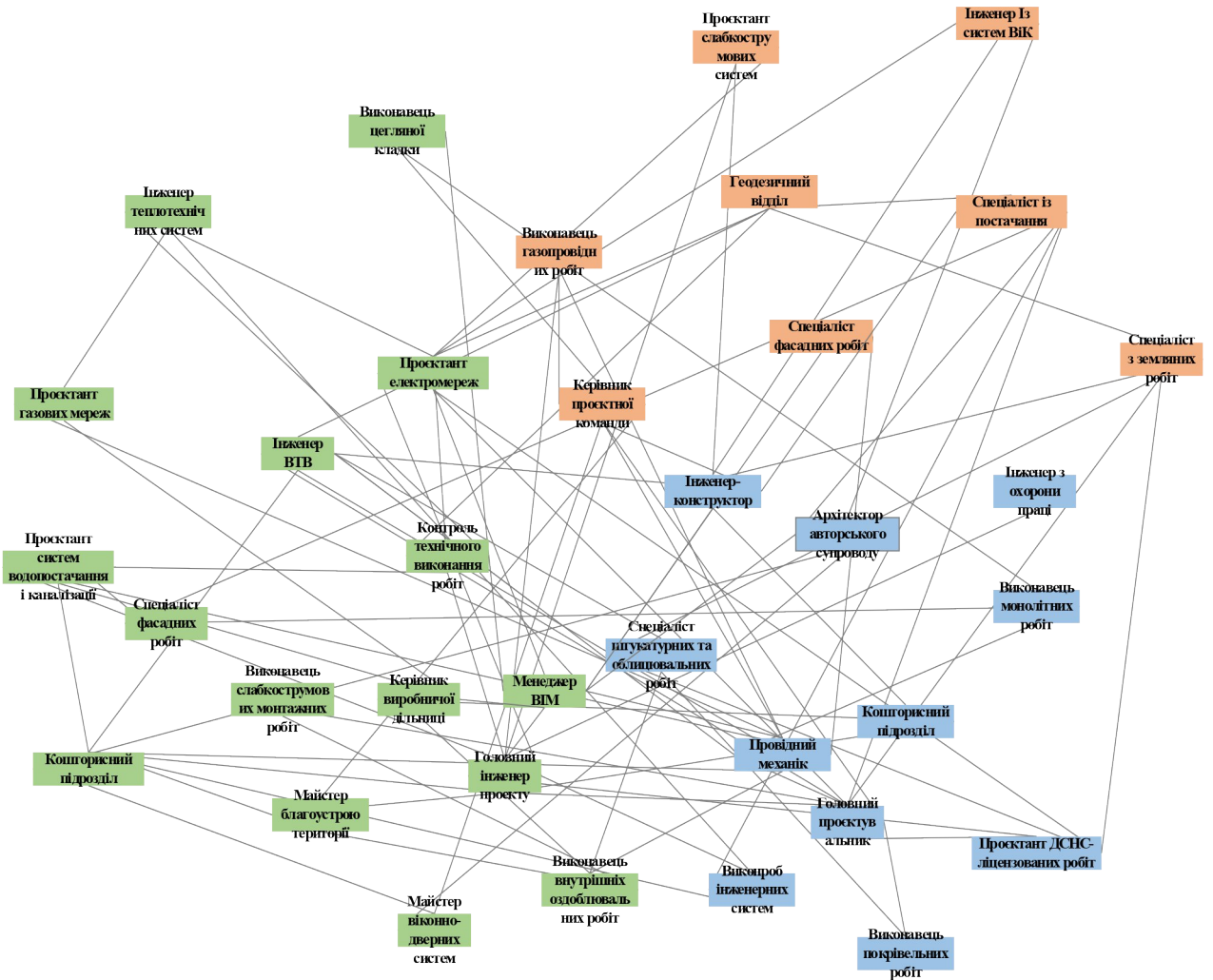


Рис.6.24. Кластеризація мережі ІІІ за алгоритмом Louvain
(розроблено автором на основі [224])

6.4. Емпірична верифікація моделі оцінки ефектів впровадження когнітивної BIM-системи

У попередніх розділах було проведено аналіз низки методів та розроблено узагальнену модель, що може слугувати інструментом для оцінки фінансових наслідків впровадження інтегрованої системи управління проєктом (IPD) разом із технологією інформаційного моделювання в будівництві (BIM), тобто спільної моделі BIM/IPD [170].

У таблиці 6.10 представлено експертні оцінки показників ефективності синергійного впливу. Зокрема, розглянуто показник S1, що відображає скорочення кількості помилок та невідповідностей, а також показник S2, який характеризує загальне зменшення термінів реалізації проєкту завдяки підвищеній координації дій. Крім того, у таблиці наведено обчислення середніх значень для цих показників.

Таблиця 6.10.

Узагальнені значення основних індикаторів ефективності під час реалізації будівельного проєкту (розроблено автором на основі [170])

Джерело дослідження	Зниження витрат, пов'язаних із правками та усуненням помилок S1, %	Витрати через перевищення строків виконання S2, %
Love	11,15	—
CIFE	10,12	—
Cannistraro	15,63	—
Giel	5,84	2,91
Azhar	2,11	—
Jongeling	4,69	0,62
Lee	12,21	—
Середнє значення	8,82	1,76

Середній рівень витрат, пов'язаних із внесенням змін, усуненням помилок та ліквідацією колізій, становить 8,82% від загальної вартості будівництва. Натомість перевищення планових строків виконання робіт формує близько 1,76% додаткових витрат [60].

У розділі 5 проведено детальний аналіз трансакційних витрат, що виникають на різних етапах життєвого циклу будівельного проєкту. Узагальнені показники наведено в таблиці 6.11.

Таблиця 6.11.

Порівняльні трансакційні витрати на різних стадіях життєвого циклу будівельного проєкту (розроблено автором на основі [60])

Дослідження	Формат реалізації проєкту	Витрати до початку будівництва	Витрати під час будівництва	Підсумкові витрати
Li & Arditi	Design–Bid–Build (DBB)	1,97	4,81	6,78
	Design–Build (DB)	2,16	5,25	7,38
	Construction Management at Risk (CMAR)	1,82	4,07	5,89
	Середнє значення	—	—	6,68
Whittington	Design–Bid–Build (DBB)	2,63	12,57	15,20
	Design–Build (DB)	2,23	9,48	11,71
	Середнє значення	—	—	13,46
Усереднення за двома дослідженнями	—	—	—	10,07

Упродовж дослідження було встановлено, що внесення змін до проєктної документації, корекція виявлених помилок та усунення колізій у процесі будівництва формують у середньому близько 8,82% витрат від загальної кошторисної вартості об'єкта. Додатково, затримки у виконанні робіт спричиняють ще приблизно 1,76% фінансових витрат. На основі цих передумов у розділі 5 проведено узагальнений аналіз трансакційних витрат, які виникають на різних етапах життєвого циклу будівельного проєкту залежно від формату організації робіт [77].

Зведені результати двох незалежних досліджень подано в таблиці 2, а для візуалізації співвідношення витрат у межах окремих методів реалізації —

Design–Bid–Build, Design–Build та Construction Management at Risk — побудовано рисунок 6.25.

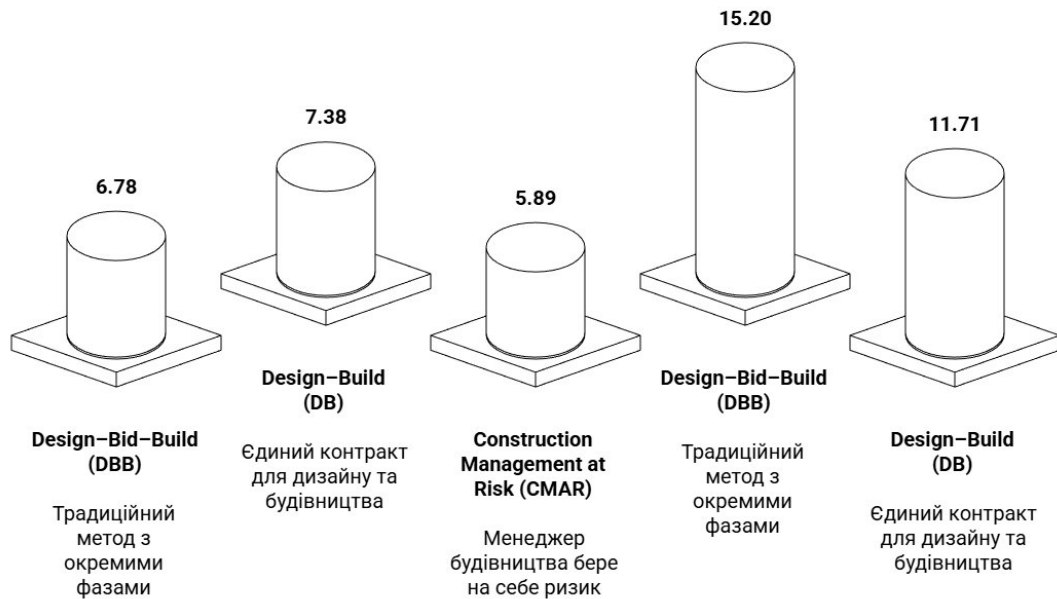


Рис.6.25. Порівняльні транзакційні витрати на різних стадіях життєвого циклу будівельного проєкту (розроблено автором на основі [77])

Рисунок чітко підкреслює, що транзакційні витрати значною мірою залежать від організаційної моделі реалізації проєкту. Найвищі витрати припадають на традиційну схему DBB (особливо у випадку Whittington), тоді як найнижчі спостерігаються у CMAR, де контроль і відповідальність сконцентровані в одного керівника процесу. Модель Design–Build демонструє проміжні значення, поєднуючи переваги інтегрованого підходу із відносною простотою традиційного укладення контрактів.

Середньостатистичний рівень транзакційних витрат у сфері будівництва становить 10,07% від загальної вартості виконаних робіт. Водночас варто зазначити, що впровадження інтегрованої моделі BIM/IPD здатне впливати лише на окремі складові цих витрат. У рамках дослідження автори розробили класифікацію транзакційних витрат, а також визначили їх відносну величину у контексті будівельних проєктів (див. табл. 6.12).

Таблиця 6.12.

Структура та орієнтовна вага основних груп транзакційних витрат у будівельній галузі (розроблено автором на основі [77])

Категорія витрат	Частка у сукупних транзакційних витратах, %
Аналітичні та пошукові операції (збір інформації)	48,2
Контрактування та узгодження умов	28,1
Підтримання технологічних процесів	9,1
Забезпечення та охорона прав власності	15,3

Запровадження спільної моделі BIM/IPD, як передбачено, може сприяти значному зниженню транзакційних витрат, зокрема витрат на пошук необхідної інформації та забезпечення технологічних процесів. Такий підхід спрямований на оптимізацію

управлінських і технічних рішень за рахунок інтеграції інформаційних ресурсів та формування єдиного середовища для співпраці учасників проекту.

У цьому контексті синергетичний ефект (S3) розраховується як:

$$10,07\% \times (48,2\% + 15,3\%) = 5,52\%$$

що демонструє його потенційний внесок у загальну ефективність реалізації проекту.

Окрім того, витрати на етапах експлуатації та обслуговування будівлі були детально розглянуті в п'ятому розділі дослідження. Аналіз відносних показників загальних витрат на будівництво систематизовано та представлено у таблиці 6.13, що дає можливість структурованого порівняння основних витратних компонентів у межах проекту [69].

Таблиця 6.13.

Структура сукупних витрат на будівництво та подальшу експлуатацію об'єкта
(розроблено автором на основі [69])

Категорія витрат	Частка у загальних витратах на будівництво й експлуатацію, %
Експлуатація об'єкта	86,2
Реалізація будівельного проекту	3,2
Технічне обслуговування	10,6

Використання спільної моделі BIM/IPD здатне вплинути на частину витрат, пов'язаних із технічним обслуговуванням будівельного об'єкта протягом періоду, коли він уже зведений (або частково зведений), але ще не введений в експлуатацію. У рамках цього дослідження такий період визначено як один рік із загальних тридцяти років життєвого циклу будівлі. Згідно з дослідженнями, витрати на експлуатацію та технічне обслуговування об'єкта можуть потенційно скоротитися на 20%.

Також важливо зазначити, що витрати на зміну проекту, скорочення термінів реалізації та трансакційні витрати обчислювалися у відсотковому співвідношенні до вартості самого будівельного проекту, тоді як технічні витрати оцінювалися від сукупної вартості будівництва і експлуатації. Оскільки хід подальших розрахунків опирається на показник «Вартість будівельного проекту», частка витрат на технічне обслуговування уточнюється. Таким чином, ці витрати становитимуть 10,6% від загальних витрат на будівництво або 400% від початкової вартості будівельного проекту [264].

Значення синергетичного ефекту (S4) сформується на основі:

$$395\% \times 20\% / 30 \text{ рік} = 2,59 \%$$

Синергетичний ефект від використання інтегрованої моделі BIM/IPD наведено у таблиці 6.14.

Таблиця 6.14.

Оцінка синергетичних переваг від впровадження інтегрованої BIM/IPD-моделі
(розроблено автором на основі [264])

Категорія витрат	Частка витрат у вартості проєкту, %	Потенційний синергетичний ефект, %
Коригування та доопрацювання проєктної документації	8,82	$S_1 = 8,81$
Перевищення строків будівельно-монтажних робіт	1,77	$S_2 = 1,75$
Трансакційні витрати (пошук інформації та підтримка процесів)	10,11	$S_3 = 5,54$
Експлуатаційні витрати об'єкта (річне технічне обслуговування)	398,5	$S_4 = 2,69$
Усього	—	18,79

Відносні показники синергетичних ефектів представлені при імовірності 100%, що, без сумніву, лишається виключно теоретично досяжним значенням. Подальшим етапом дослідження є обчислення значень усіх чотирьох синергетичних ефектів за рівнів імовірності 25%, 50%, 75% і 100%. Ця задача реалізована за допомогою програми MS Office Excel, яка містить 256 записів. Розрахунок інвестиційних витрат, необхідних для запуску та впровадження інновації (CI), подано в таблиці 6.15.

Таблиця 6.15.

Вхідні показники для визначення інвестиційних витрат, грн
(розроблено автором на основі [18])

Показник	Позначення	Нова величина
Середня оплата праці працівника, який проходить навчальну підготовку	C_e	12 945
Тривалість навчання, координації та налаштування робочого місця одного працівника	T_{sb}	3,4
Кількість фахівців, що проходять інтеграцію у систему	y	10
Чисельність помічників керівника проєкту	j	2
Витрати на персонал з урахуванням тимчасового зниження продуктивності	$y \times (C_e \times T_{sb})$	131 388
Середня вартість спеціалізованої підготовки працівника	C_{st}	16 042
Вартість придбання комп'ютерних робочих станцій	C_{ice}	36 209
Витрати на закупівлю та впровадження програмного забезпечення	C_{ls}	105 214
Витрати на придбання та структурування баз даних	C_{ldb}	16 487
Середня ставка оплати праці помічника керівника проєкту	C_{as}	21 184
Тривалість адаптації помічника керівника в інтегрованому середовищі	T_{ad}	3,3
Підсумковий обсяг інвестиційних витрат	—	2 327 956

Показники «Середня заробітна плата працівника, який проходить навчання» та «Витрати на персонал із урахуванням тимчасового зниження продуктивності» визначені на основі даних, наведених у таблиці 6.16.

Таблиця 6.16.

Вихідні параметри для визначення витрат на оплату праці персоналу, грн. (розроблено автором на основі [18])

Посада	Кількість працівників	Місячна ставка, грн	Зниження продуктивності, грн	Підсумок (з урахуванням втрат), грн
			1-й місяць (50%)	2-й місяць (20%)
Архітектори	2	18 940	9 470	3 790
Інженери з електромеханічного проектування	2	15 870	7 935	3 170
Конструктори (інженери з будівельних конструкцій)	2	15 860	7 930	3 165
Інженери-кошторисники	1	15 740	7 870	3 150
Керівник проекту	1	23 640	11 820	4 725
Інженери-проектувальники	2	11 040	5 520	2 210
Разом по персоналу	10	101 090	50 545	20 210
Помічники керівника проекту	2	21 230	21 230	10 615

Таблиця 6.17 наводить розрахунок операційних витрат, пов'язаних із функціонуванням нової інформаційно-комунікаційної системи.

Таблиця 6.17.

Показники для визначення експлуатаційних витрат у розрахунковому періоді, грн
(розроблено автором на основі [258])

Показник	Позначення	1-й рік	2-й рік	3-й рік
Обслуговування комп'ютерної техніки	CO_{ce}	0	18 320	36 640
Підтримка програмного забезпечення	CO_s	0	105 750	105 750
Підтримка баз даних	CO_{db}	0	16 540	16 540
Місячна оплата праці помічника керівника	C_{as}	21 180	21 180	21 180
Робочий час помічника керівника в системі	T_w	9,2	12,3	12,3
Додаткове навчання співробітників (тривалість)	T_{sadd}	3	3	3
Частка працівників, що потребують повторного навчання	x	10%	10%	10%
Середня оплата праці співробітника, що проходить навчання	C_e	13 015	13 015	13 015
Кількість працівників, інтегрованих у систему	y	10	10	10
Число помічників керівника проекту	j	2	2	2
Разом витрати за рік	—	395 840	2 214 960	2 431 780
Дисконтована вартість (10%)	—	395 840	2 438 456	2 674 958
Накопичувальний підсумок	—	395 840	2 834 296	5 509 254

Для обґрунтування витрат на підготовку персоналу було проаналізовано структуру заробітних плат основних фахівців, залучених до реалізації проекту [180]. Вихідні дані щодо кількості працівників, їхньої місячної ставки, а також величини тимчасових витрат

продуктивності наведені в таблиці [99]. На підставі цих показників сформовано сукупний розподіл персоналу за професійними групами та рівнем оплати праці, що відображено на наведеному нижче рисунку 6.26.



Рис.6.26. Розподіл загальних витрат на персонал (розроблено автором на основі [99])

Рисунок візуалізує кадровий склад проєктної команди відповідно до професійних категорій та рівнів місячної оплати праці. Кожен сегмент відображає окрему групу фахівців із зазначенням їхньої чисельності та базової ставки.

Секторна побудова дає змогу швидко оцінити співвідношення різних категорій персоналу та згрупувати їх за рівнем фінансового навантаження на фонд оплати праці. Візуальна форма діаграми також дозволяє оперативно визначити найбільш ресурсоємні позиції та оцінити їхній вплив на загальну структуру витрат, пов'язаних із навчанням і тимчасовим зниженням продуктивності фахівців [269].

Загальні витрати, пов'язані із впровадженням інновацій, представлені в таблиці 6.18.

Таблиця 6.18.

Загальний обсяг витрат на впровадження інноваційних рішень, грн.
(розроблено автором на основі [258])

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік
Інвестиційні вкладення	2 339 480	0	0
Витрати при використанні	397 120	2 438 456	2 689 740
Загальні витрати за рік	2 736 600	2 438 456	2 689 740
Кумулятивний підсумок	2 736 600	5 182 580	7 872 320

Наступним етапом проведеного дослідження є детальний аналіз ефективності впровадження та функціонування інформаційно-комунікаційної системи в умовах інтегрованого підходу до реалізації інвестиційно-будівельного проєкту. У ході роботи було здійснено порівняльний аналіз загальних витрат, що виникають у разі застосування традиційних методів реалізації проєктів, з витратами, характерними для інтегрованого підходу до управління будівельними проєктами. У таблиці 6.19 представлено відсотковий розподіл витрат за роками виконання проєкту, що дозволяє оцінити динаміку їх змін залежно від обраного методу реалізації [7].

Таблиця 6.19.

Порівняльний розподіл витрат будівельного проєкту залежно від обраного підходу до його реалізації, % (розроблено автором на основі [7])

Рік	Інтегрований метод реалізації, %	Традиційна модель реалізації, %
1-й рік	58,34	12,05
2-й рік	37,61	78,92
3-й рік	4,05	11,18

Аналіз витратної структури будівельного проєкту був продовжений шляхом порівняння динаміки фінансових потоків у двох підходах до управління — традиційному та інтегрованому. Попередньо наведений у таблиці розподіл витрат за роками дозволив простежити, як змінюється інтенсивність фінансування залежно від організаційної моделі реалізації. Для наочності результатів проведеного порівняння побудовано відповідний рисунок 6.27, яка демонструє характерну різницю між піками та фазами витрат у межах двох підходів [4].

У межах подальшого аналізу було розглянуто будівельні проєкти з орієнтовною вартістю 40, 50 та 60 млн грн. Дослідження передбачало визначення інтегральної величини синергетичних ефектів (ΣI), які можуть виникати в разі застосування інтегрованого підходу BIM/IPD. Оцінювання проводилося за кількома рівнями ймовірності реалізації синергетичних переваг — 100%, 75%, 50% та 25%.

Для уточнення варіаційних характеристик було сформовано репрезентативну вибірку за допомогою інструмента Sampling у модулі Analysis ToolPak (MS Excel). Вибірковий масив охоплював 256 значень, на основі яких отримано випадкові синергетичні коефіцієнти: Вибірка 1 — 10,26%; Вибірка 2 — 15,47%; Вибірка 3 — 19,22%; Вибірка 4 — 10,58%; Вибірка 5 — 17,94% [4].

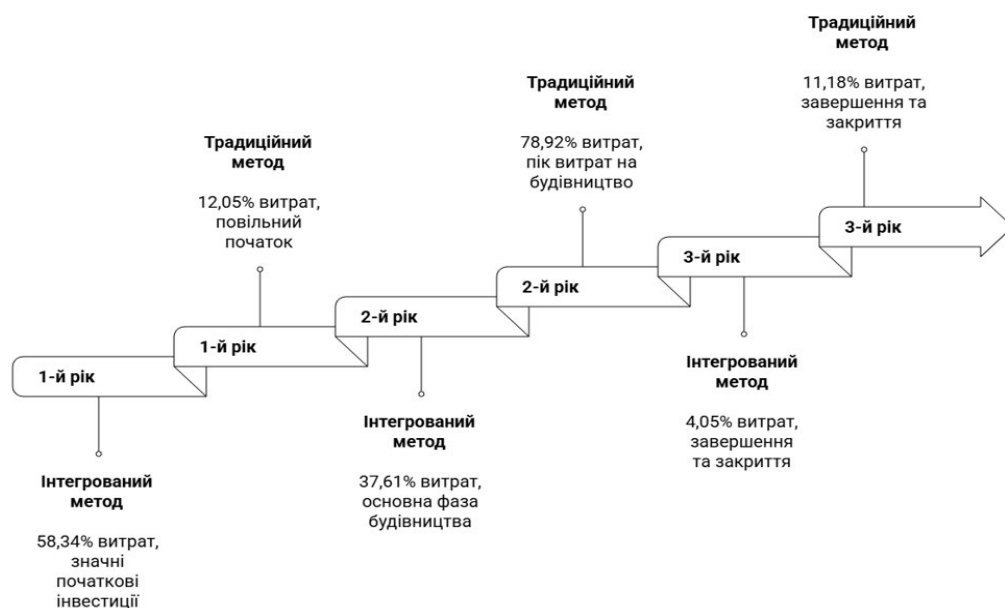


Рис.6.27. Порівняльний розподіл витрат будівельного проєкту
(розроблено автором на основі [4])

На основі даних, представлених у таблиці 11 та на рисунку 6.28, встановлено, що при реалізації будівельного проєкту із загальною кошторисною вартістю 40 мільйонів гривень ефективність впровадження спільної моделі BIM/IPD проявляється виключно за умови абсолютної ймовірності виникнення синергетичних ефектів, тобто при 100% їх настанні [180].

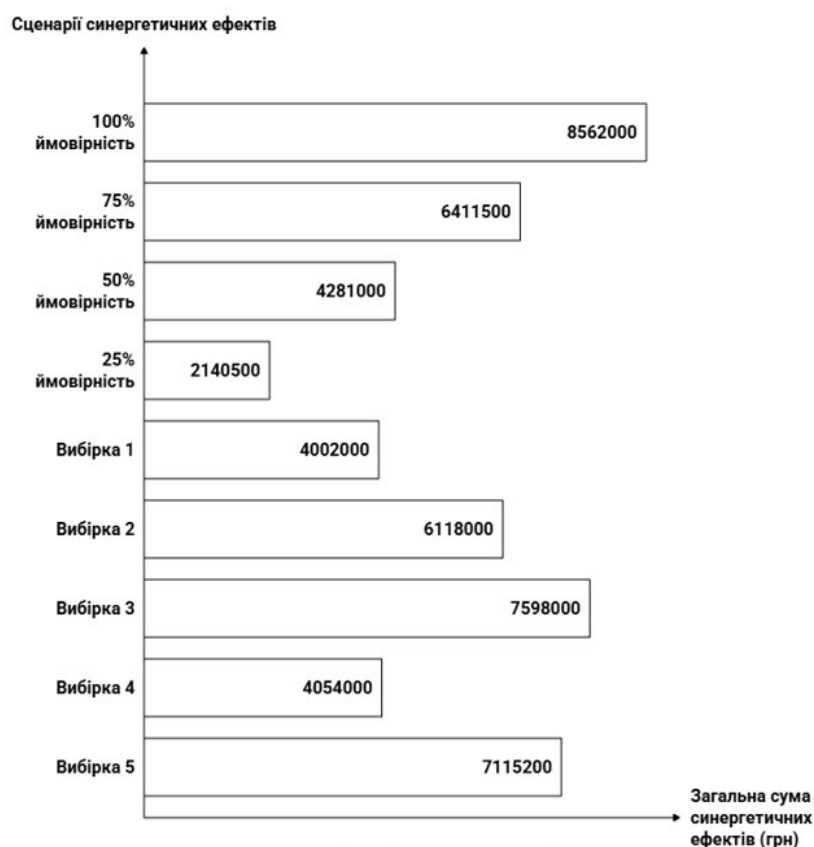


Рис. 6.28. Оцінювання результативності застосування інноваційних рішень у межах проєкту вартістю 40 млн грн (розроблено автором на основі [270])

Результати оцінювання для будівельного проєкту загальною вартістю 40 млн грн наведено у таблиці 6.20 та представлені графічно на рисунку 4.

Таблиця 6.20.

Оцінювання результативності застосування інноваційних рішень у межах проєкту вартістю 40 млн грн (розроблено автором на основі [4])

Показник	1 рік	2 рік	3 рік	Разом
Сума витрат на запровадження інтегрованої моделі BIM/IPD, грн	2 736 600	2 438 456	2 689 740	7 872 320
Розподіл витрат при інтегрованій реалізації проєкту, %	58,34	37,61	4,05	100,00
Вартість проєкту, грн	40 000 000			
Сума синергетичних ефектів, % від вартості (ймовірність 100%)	21,96			
Розподіл синергетичних ефектів, грн	4 995 200	3 215 840	350 960	8 562 000
Сума синергетичних ефектів, % від вартості (ймовірність 75%)	16,47			
Розподіл синергетичних ефектів, грн	3 736 400	2 411 880	263 220	6 411 500
Сума синергетичних ефектів, % від вартості (ймовірність 50%)	10,98			
Розподіл синергетичних ефектів, грн	2 497 600	1 607 920	175 480	4 281 000
Сума синергетичних ефектів, % від вартості (ймовірність 25%)	5,49			
Розподіл синергетичних ефектів, грн	1 248 800	803 960	87 740	2 140 500
Сума синергетичних ефектів, % від вартості (вибірка 1)	10,26			
Розподіл синергетичних ефектів, грн	2 324 800	1 514 960	162 240	4 002 000
Сума синергетичних ефектів, % від вартості (вибірка 2)	15,47			
Розподіл синергетичних ефектів, грн	3 505 600	2 359 680	252 720	6 118 000
Сума синергетичних ефектів, % від вартості (вибірка 3)	19,22			
Розподіл синергетичних ефектів, грн	4 354 400	2 933 760	309 840	7 598 000
Сума синергетичних ефектів, % від вартості (вибірка 4)	10,58			
Розподіл синергетичних ефектів, грн	2 329 600	1 559 760	164 640	4 054 000
Сума синергетичних ефектів, % від вартості (вибірка 5)	17,94			
Розподіл синергетичних ефектів, грн	4 067 200	2 765 760	282 240	7 115 200

Результати аналізу для проєктів загальною вартістю 50 млн. грн. наведені у табл. 6.21 та на рис. 6.29.

Таблиця 6.21.

Оцінювання результативності впровадження інтегрованої BIM/IPD-моделі (вартість проєкту 50 млн грн) (розроблено автором на основі [186])

Аналітичний показник	1 рік	2 рік	3 рік	Разом
Витрати, пов'язані з упровадженням інтегрованої організаційно-технологічної моделі BIM/IPD, грн	2 736 600	2 445 980	2 689 740	7 872 320
Питома структура витрат у межах інтегрованого методу реалізації, %	58,34	37,61	4,05	100,00
Загальний фінансовий обсяг будівельного проєкту, грн	50 000 000			
Сукупний синергетичний ефект, % від кошторисної вартості (імовірність реалізації 100%)	22,04			
Розподіл еквівалента синергетичних вигід у грошовому вимірі, грн	6 248 000	4 257 840	434 360	10 940 200
Сукупний синергетичний ефект, % від вартості (імовірність 75%)	16,53			
Розподіл еквівалента синергетичних вигід, грн	4 686 000	3 193 380	325 770	8 205 150
Сукупний синергетичний ефект, % від вартості (імовірність 50%)	11,02			
Розподіл еквівалента синергетичних вигід, грн	3 124 000	2 129 040	217 180	5 470 220
Сукупний синергетичний ефект, % від вартості (імовірність 25%)	5,51			
Розподіл еквівалента синергетичних вигід, грн	1 562 000	1 064 520	108 590	2 735 110
Синергетичний ефект згідно з вибіркою 1 (10,28%)				
Розподіл грошового еквівалента ефекту, грн	2 884 000	1 963 360	200 640	5 048 000
Синергетичний ефект згідно з вибіркою 2 (15,49%)				
Розподіл грошового еквівалента ефекту, грн	4 365 000	2 973 780	304 220	7 643 000
Синергетичний ефект згідно з вибіркою 3 (19,24%)				
Розподіл грошового еквівалента ефекту, грн	5 412 000	3 681 360	376 440	9 469 800
Синергетичний ефект згідно з вибіркою 4 (10,60%)				
Розподіл грошового еквівалента ефекту, грн	2 975 000	1 569 300	165 900	4 710 200
Синергетичний ефект згідно з вибіркою 5 (17,88%)				
Розподіл грошового еквівалента ефекту, грн	5 057 000	3 447 240	351 760	8 855 800

Як видно з оновлених даних таблиці 6.22 та рисунка 6.29, інтегрована модель BIM/IPD демонструє відчутні переваги для будівельного проєкту вартістю 60 млн грн, якщо рівень досягнення синергетичних вигід становить не менше 70–100%. Саме за цих сценаріїв система забезпечує додатне фінансове сальдо й виправдовує початкові інвестиції.

Паралельно було сформовано три орієнтовні випадкові значення можливого синергетичного зиску:— для вибірки 2 — 15,48%,— для вибірки 3 — 19,15%,— для вибірки 5 — 17,92% [270].

Таблиця 6.22

Оцінювання результативності застосування інтегрованої BIM/IPD-моделі в умовах реалізації будівельного проєкту вартістю 60 млн грн (розроблено автором на основі [270])

Показник	1 рік	2 рік	3 рік	Разом
Інвестиційно-експлуатаційні витрати на впровадження BIM/IPD, грн	2 744 900	2 412 300	2 693 600	7 850 800
Структура витрат у межах інтегрованого підходу, %	58,22	37,67	4,11	100,00
Загальна кошторисна вартість проєкту, грн	60 000 000			
Сукупний синергетичний ефект, % від вартості (ймовірність 100%)	21,98			
Розподіл синергетичного результату, грн	7 521 600	5 105 300	521 400	13 148 300
Сукупний синергетичний ефект, % від вартості (ймовірність 75%)	16,48			
Розподіл синергетичного результату, грн	5 641 200	3 825 100	391 300	9 857 600
Сукупний синергетичний ефект, % від вартості (ймовірність 50%)	10,99			
Розподіл синергетичного результату, грн	3 760 800	2 550 200	259 900	6 570 900
Сукупний синергетичний ефект, % від вартості (ймовірність 25%)	5,49			
Розподіл синергетичного результату, грн	1 880 400	1 275 100	129 950	3 285 450
Синергетичний ефект за вибіркою 1 (10,11%)				
Розподіл синергетичного результату, грн	3 462 400	2 357 900	240 300	6 060 600
Синергетичний ефект за вибіркою 2 (15,48%)				
Розподіл синергетичного результату, грн	5 247 600	3 577 900	365 600	9 191 100
Синергетичний ефект за вибіркою 3 (19,15%)				
Розподіл синергетичного результату, грн	6 530 400	4 438 900	452 900	11 422 200
Синергетичний ефект за вибіркою 4 (10,42%)				
Розподіл синергетичного результату, грн	3 588 600	1 584 100	167 900	4 340 600
Синергетичний ефект за вибіркою 5 (17,92%)				
Розподіл синергетичного результату, грн	6 087 600	4 142 400	424 400	10 654 400

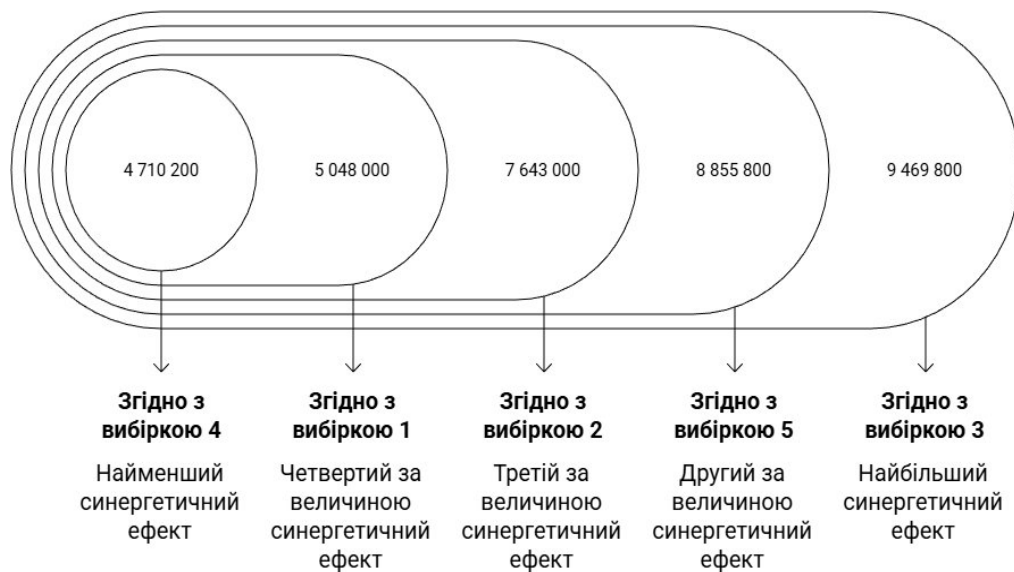


Рис. 6.29. Оцінювання результативності впровадження інтегрованої BIM/IPD-моделі (вартість проекту 50 млн грн) (розроблено автором на основі [186])

Узагальнені результати для проектів із загальною кошторисною вартістю 60 млн грн наведено у таблиці 6.22 та продемонстровано графічно на рисунку 6.30.

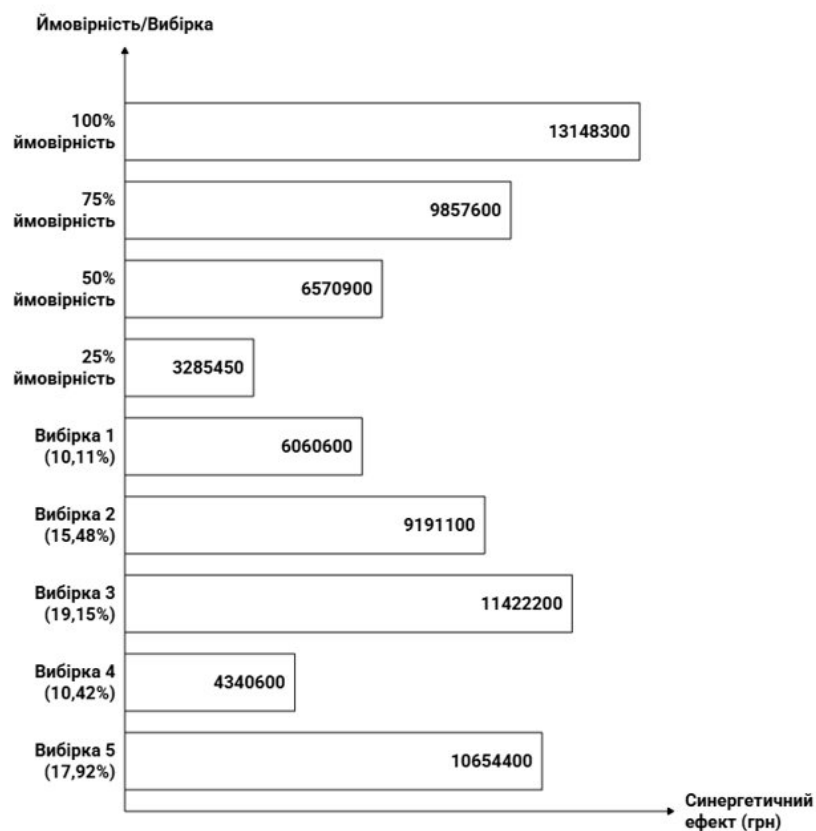


Рис. 6.30. Оцінювання результативності застосування інтегрованої BIM/IPD-моделі в умовах реалізації будівельного проекту вартістю 60 млн грн (розроблено автором на основі [246])

За даними табл. 13 та рис. 3 встановлено, що для будівельного проєкту вартістю 60 млн грн впровадження інтегрованої моделі BIM/IPD забезпечує позитивний результат за умови досягнення 75% і 100% імовірності прояву синергетичних ефектів. Додатково ефективність підтверджується результатами чотирьох стохастичних вибірок синергії, які продемонстрували значення 15,48%, 19,15%, 10,35% та 17,92% відповідно.

Загальні висновки та результати дослідження

Сучасний етап розвитку будівельної галузі характеризується переходом до якісно нових форм організації проєктної діяльності, що зумовлено ускладненням об'єктів будівництва, зростанням інформаційної насиченості процесів, цифровізацією управлінських контурів та підвищенням вимог до результативності й стійкості реалізації проєктів. За таких умов будівельний проєкт перестає бути сукупністю лінійно пов'язаних технологічних операцій і набуває ознак складної відкритої системи, у межах якої взаємодіють численні учасники, різномірні інформаційні потоки, організаційні структури та знаннєві ресурси. Це зумовлює необхідність переосмислення управління будівництвом як багатовимірного інтелектуального процесу, що виходить за межі традиційних інженерно-адміністративних підходів.

Узагальнення результатів дослідження дозволяє стверджувати, що ключовою обмежувальною ланкою традиційних систем управління будівельними проєктами є їх орієнтація на формалізовані процедури, жорстку ієрархію та статичні моделі прийняття рішень. У сучасному девелопменті, де проєктна діяльність реалізується в умовах постійних змін, невизначеності та множинності інтересів, такі підходи втрачають здатність забезпечувати узгодженість управлінських дій і своєчасну адаптацію до змін середовища. Це проявляється у зростанні кількості переробок, інформаційних розривів, конфліктів інтерпретацій і трансакційних витрат.

Доведено, що ефективність управління будівельними проєктами безпосередньо залежить від здатності управлінської системи формувати та підтримувати цілісний когнітивний простір, у межах якого інформація не лише накопичується, а інтерпретується, осмислюється та трансформується у знання. Саме знання, а не дані як такі, виступають визначальним ресурсом прийняття управлінських рішень у складному проєктному середовищі. Управління в цьому контексті постає як процес організації колективної когнітивної діяльності, що включає аналіз ситуацій, формування спільного бачення проблем, узгодження смислів і координацію дій між учасниками проєкту.

Систематизація еволюції управлінських підходів у проєктному менеджменті показала, що сучасний етап розвитку характеризується поступовим зміщенням акценту від ієрархічних моделей до мережових і інтегрованих форм організації взаємодії. У таких формах відсутній єдиний центр прийняття рішень, а управлінські функції розподіляються між учасниками відповідно до їх ролей, компетенцій і доступу до інформації. За цих умов ключового значення набуває не формальний контроль, а здатність системи забезпечувати когнітивну узгодженість рішень у динамічному середовищі.

Уведено та обґрунтовано поняття когнітивної стабільності системи управління будівельними проєктами, під якою розуміється здатність зберігати узгодженість управлінських рішень і цілісність знаннєвого простору за умов змін проєктних параметрів, організаційних конфігурацій і зовнішніх обмежень. Встановлено, що порушення когнітивної стабільності є однією з основних причин деградації управлінських процесів, що проявляється у фрагментації рішень, зростанні кількості конфліктів і втраті довіри між учасниками проєкту.

Особливу роль у формуванні сучасних систем управління будівельними проєктами відіграють цифрові технології, насамперед технології інформаційного моделювання будівель. Показано, що BIM-технології створюють потужну інформаційну

інфраструктуру, здатну інтегрувати геометричні, технічні, організаційні та економічні дані в єдиному цифровому середовищі. Водночас доведено, що сам по собі високий рівень цифровізації не гарантує підвищення ефективності управління. За відсутності когнітивної інтеграції BIM-середовище може перетворюватися на джерело інформаційного перевантаження, що ускладнює прийняття рішень і знижує керованість проєкту.

Обґрунтовано, що ключовою умовою ефективного використання BIM є його інтеграція в управлінський контур як інструмент формування знань, а не лише зберігання даних. Це передбачає структурування інформаційних потоків відповідно до управлінських функцій, рівнів відповідальності та когнітивних потреб учасників проєкту. У такому підході BIM виступає основою когнітивного простору, у межах якого формується спільне розуміння проєктної ситуації та забезпечується узгодженість рішень.

Значну увагу приділено проблематиці управління знаннями у будівельних проєктах. Встановлено, що поряд з формалізованими знаннями, зафіксованими в цифрових моделях і документації, вагому роль відіграють неявні знання, пов'язані з професійним досвідом, інтуїцією та контекстним розумінням ситуацій. Ігнорування неявних знань призводить до втрати управлінського потенціалу, зниження якості рішень і зростання кількості помилок. Запропоновані підходи до ідентифікації та інтеграції таких знань створюють передумови для підвищення зрілості систем управління.

Системний аналіз інтеграції цифрових технологій, управління знаннями та організаційно-мережевих структур дозволив виявити механізми формування синергетичних ефектів у будівельних проєктах. Показано, що синергія виникає не внаслідок простого поєднання окремих інструментів, а як результат їх узгодженої взаємодії в єдиній системі. Така взаємодія забезпечує не лише кількісні ефекти у вигляді скорочення строків і витрат, а й якісні зміни управлінських процесів — підвищення адаптивності, зниження невизначеності та стабілізацію проєктної динаміки.

Запропонована когнітивно-інтеграційна модель управління будівельними проєктами дозволяє формалізувати взаємозв'язки між учасниками, інформаційними потоками та управлінськими рішеннями. Модель враховує вплив транзакційних витрат, ефектів взаємодії та змін проєктних параметрів на загальну динаміку системи. Використання математичних і алгоритмічних інструментів забезпечує можливість аналітичної підтримки прийняття рішень і прогнозування наслідків управлінських дій у складному середовищі.

Обґрунтовано доцільність застосування методів мережевого аналізу та кластеризації для дослідження структури знань і комунікаційних потоків у будівельних проєктах. Ідентифікація інтелектуальних спільнот дозволяє виявити ключові вузли генерації та поширення знань, а також оптимізувати взаємодію між учасниками проєкту. Це створює передумови для формування механізмів колективного навчання та накопичення організаційного досвіду.

Розглянуто можливості інтеграції BIM із технологіями аналізу великих даних як інструменту поглибленого дослідження управлінських процесів. Така інтеграція розширює аналітичні можливості систем управління, дозволяє виявляти приховані закономірності у проєктній діяльності та адаптувати управлінські рішення до специфіки публічних і приватних будівельних замовлень. Емпірична перевірка підтвердила практичну релевантність запропонованих підходів і їх здатність забезпечувати зниження рівня інформаційних дисонансів і стабілізацію управлінських процесів.

Отримані результати формують цілісне науково обґрунтоване підґрунтя для розвитку інтелектуально орієнтованих систем управління будівельними проєктами. Когнітивно-інтеграційний підхід до організації будівництва дозволяє подолати обмеження традиційних управлінських моделей, підвищити узгодженість рішень і забезпечити стійкий розвиток будівельних проєктів у середовищі сучасного девелопменту. Запропоновані положення можуть бути використані як у практиці девелоперських, проєктних і будівельних організацій, так і в наукових дослідженнях та освітніх програмах, спрямованих на інтелектуалізацію управління будівництвом.

Окремого значення в контексті отриманих результатів набуває питання відтворюваності та масштабованості когнітивно-інтеграційних підходів у різних типах будівельних проєктів. Показано, що ефективність запропонованих моделей не обмежується специфікою окремих об'єктів або організаційних форм, а визначається універсальними закономірностями взаємодії інформаційних, знанневих і управлінських компонентів. Це створює передумови для адаптації когнітивно-інтеграційного інструментарію як у великих девелоперських проєктах, так і в середніх та малих будівельних програмах, з урахуванням їх організаційних і ресурсних обмежень.

Важливим результатом є обґрунтування можливості поетапного впровадження когнітивно орієнтованих управлінських рішень без необхідності радикальної перебудови існуючих систем управління. Запропонований підхід дозволяє інтегрувати когнітивні механізми поступово, через удосконалення окремих елементів управлінського контуру — структурування інформаційних потоків, оптимізацію комунікацій, формалізацію знанневих процедур та впровадження інструментів аналітичної підтримки рішень. Така еволюційна логіка впровадження знижує організаційні ризики та підвищує прийнятність змін для учасників проєкту.

Показано, що когнітивно-інтеграційний підхід створює умови для формування довгострокової управлінської пам'яті проєкту, що акумулює досвід прийняття рішень, типові помилки та ефективні практики взаємодії. Наявність такої пам'яті підвищує здатність організацій до навчання, знижує залежність результатів від індивідуальних носіїв знань і сприяє підвищенню інституційної стійкості управлінських процесів. У середовищі сучасного девелопменту це набуває особливої актуальності з огляду на високу плінність кадрів і багатосуб'єктний характер проєктної діяльності.

Додатково встановлено, що інтеграція когнітивних механізмів у систему управління сприяє підвищенню прозорості управлінських рішень і довіри між учасниками проєкту. Формалізація логіки прийняття рішень, відображення причинно-наслідкових зв'язків і наслідків управлінських дій у цифровому середовищі зменшує ймовірність суб'єктивних інтерпретацій і конфліктів інтересів. Це створює сприятливі умови для узгодження рішень у межах інтегрованих форм реалізації проєктів, зокрема у системах партнерської взаємодії та публічних будівельних замовленнях.

Загалом доповнення підтверджує, що когнітивно-інтеграційний інструментарій організації будівництва має не лише поточну прикладну цінність, а й стратегічний потенціал розвитку управлінських систем. Його застосування сприяє переходу від реактивного управління до проактивного, заснованого на аналізі знанневих процесів, прогнозуванні наслідків рішень і формуванні стійких траєкторій розвитку будівельних проєктів у середовищі сучасного девелопменту.

Література

1. «Building-information modeling – технологии XXI века» [Електронний ресурс]. DedalSoft, 2014. Режим доступу: <https://uscc.ua/ru/news/building-information-modeling-tehnologii-xxi-veka>
2. Acciarini, C., Bianchi, M., & et al. How can organizations leverage big data to innovate their business models? [Електронний ресурс]. — Technovation, 2023. DOI: 10.1016/j.technovation.2023.102789.
3. Ahmad H.S. Development of KM model for knowledge management implementation in the construction industry: PhD thesis. – University of Birmingham, 2011. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://etheses.bham.ac.uk/1307/1/Ahmad11PhD_A1a.pdf
4. Ahmad S. H., Chan M., Wei W. (Eds.). Building Information Modelling (BIM) for Construction Supply Chain: A Scientometric Analysis. ScienceOpen Book, published 2022. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.scienceopen.com/book?vid=b9bbbf22-3ee7-4979-bdbf-11326f3e31e2>
5. Alavi, H., та ін. Building Information Modeling for Facility Managers: Integration of BIM Data into Facility Management Systems [Електронний ресурс]. — 2022.
6. Alexander K., Brown M. Facilities Management: Theory and Practice. – London : Routledge, 2016. – 392 p.
7. Alghuried A. et al. «Measuring the Benefits and Barriers of the Implementation of BIM in Saudi Arabia». Sustainability, Vol. 15(19), 2023. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/19/14323>
8. Allmon, E., Borcherdig, J., Goodrum, P., & Haas, C. U.S. Construction Labor Productivity Trends, 1970-1998 [Електронний ресурс]. — Journal of Construction Engineering and Management, 2000, Vol. 126, No. 2, P. 97–104. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2000)126:2(97). Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/238777794_US_Construction_Labor_Productivity_Trends_1970-1998
9. Almusaed A. «Integrating the Brain–Computer Interface and Building Information Modeling (BCI-BIM) for Construction Workflows» (магістерська/докторська робота), 2024. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://surl.li/crybim>
10. Alnajjar O. A Systematic Review of Lean Construction, BIM and Their Integration Effects on Project Performance / O. Alnajjar // Buildings. — 2025. — Vol. 15, Iss. 16. — Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/16/2884>
11. Alshehri A. M., et al. “Building information modeling (BIM) driven performance ...” // Elsevier, 2024. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266701002400146X>
12. Al-Sinan, M. A., Bubshait, A. A., & Aljaroudi, Z. Generation of Construction Scheduling through Machine Learning and BIM: A Blueprint [Електронний ресурс]. — Buildings, 2024, Vol. 14, Art. 934. DOI: 10.3390/buildings14040934.
13. Abanda, F. H., Tah, J. H. M., & Cheung, F. K. T. BIM in off-site manufacturing for buildings [Електронний ресурс]. — Journal of Building Engineering, 2017. — Vol. 14. — P. 89–102. — DOI: 10.1016/j.jobee.2017.10.002.
14. Amede, E. A., Woldesenbet, K. W., Bahiru, A. K., Tibebe, T. F., Hailemariam, L. M. Transforming construction in emerging economies: overcoming barriers to the adoption of

industrialized building systems [Электронный ресурс]. — SN Applied Sciences, 2025, Vol. 7, Art. 765. DOI:10.1007/s42452-025-06963-w.

15. Anumba C.J., Egbu C.O., Carrillo P. (eds.) Knowledge Management in Construction. — Oxford: Wiley-Blackwell, 2005. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470759554>

16. Apeesada Sompolgrunk, Saeed Banihashemi, Saeed Reza Mohandes. Building information modelling (BIM) and the return on investment: a systematic analysis [Электронный ресурс]. — ResearchGate, 2021. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/356718604_Building_information_modelling_BIM_and_the_return_on_investment_a_systematic_analysis

17. Arrow K. J. Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention // The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors. — Princeton : Princeton University Press, 1962. — P. 609–626.

18. Attia A. R. «The impact of integrating artificial intelligence and Building Information Modeling (BIM) systems on the development of construction methodologies». Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture, 2025. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s43995-025-00193-2>

19. Australasian BIM Advisory Board. Harmonisation of Building Information Modelling and Digital Engineering Services Procurement. — Sydney: ABAB, 2023. — 49 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.abab.net.au/wp-content/uploads/2023/09/ABAB-Harmonisation-of-BIM-and-DE-Services-Procurement-Guide-30923.pdf>

20. Azhar S. Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry // Automation in Construction. — 2011. — Vol. 20, No. 2. — P. 241–252.

21. Arayici Y., Coates P., Koskela L., Kagioglou M., Usher C., O'Reilly K. Building information modelling (BIM) implementation and remote construction projects: Issues, challenges, and benefits // Automation in Construction. — 2011. — Vol. 20, No. 6. — P. 822–831.

22. Abanda F. H., Tah J. H. M., Cheung F. K. T. BIM in off-site manufacturing for buildings // Journal of Building Engineering. — 2017. — Vol. 14. — P. 89–102.

23. Bacon F. Meditationes Sacrae. — London: Excusum impensis Humfredi Hooper, 1597. — [6. c.]

24. Baiden, B. K., Price, A. D. F., & Dainty, A. R. J. (2006). The extent of team integration within construction projects. International Journal of Project Management, 24(1), 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2005.05.001>

25. Barlish, K., & Sullivan, K. How to measure the benefits of BIM — a case study approach // Automation in Construction. — 2012. — Vol. 24, P. 149–159. Режим доступа: <https://core.ac.uk/download/pdf/79560045.pdf>

26. Barney J. B. Firm Resources and Sustained Competitive Advantage // Journal of Management. — 1991. — Vol. 17, No. 1. — P. 99–120.

27. Becerik-Gerber B., Jazizadeh F., Li N., Calis G. Application areas and data requirements for BIM-enabled facilities management // Journal of Construction Engineering and Management. — 2012. — Vol. 138, No. 3. — P. 431–442.

28. Bosch A., Volker L., Koutamanis A. BIM in the operations stage: Bottlenecks and implications for owners // Built Environment Project and Asset Management. — 2015. — Vol. 5,

- No. 3. – P. 331–343. Bertalanffy L. von. General System Theory: Foundations, Development, Applications. – New York : George Braziller, 1968. – 289 p.
29. Biersteker E., et al. Integrating knowledge in infrastructure projects: governance mechanisms in large-scale projects // International Journal of Project Management. – 2023. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01446193.2023.2210695>
30. BIM Deutschland – Nationale Plattform. Fortschrittsbericht zur Umsetzung der nationalen BIM-Strategie des Bundes [Электронный ресурс]. – Berlin : Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2021. – 96 S. – Режим доступа: <https://www.bimdeutschland.de/SharedDocs/Downloads/DE/BIM-Deutschland/fortschrittsbericht-bim-strategie.pdf>
31. BIM Industry Working Group. Government Construction Strategy: BIM Working Group Strategy Paper / Department for Business, Innovation and Skills. – London, 2011. – 52 p.
32. Biriş, C.-D. Network oriented enterprise – characteristics, components and benefits: comprehensive literature review [Электронный ресурс]. — Annals of the University of Oradea, Economic Sciences, 2024, Vol. XXXIII, Issue 1, p. 497–506. Режим доступа: https://anale.steconomiceuoradea.ro/en/wp-content/uploads/2024/11/AUOES.July_.2024.52.pdf.
33. Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. Building Information Modeling [Электронне видання]. – Cham: Springer International Publishing, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-92862-3.
34. Bouabdallaoui, Y., Lafhaj, Z., Yim, P., Ducoulombier, L., & Bennadji, B. Predictive Maintenance in Building Facilities: A Machine-Learning-Based Approach [Электронный ресурс]. — Sensors, 2021, Vol. 21, Art. 1044. DOI: 10.3390/s21041044.
35. Braha D., Bar-Yam Y. Topology of large-scale engineering problem-solving networks // Physical Review E. – 2004. – Vol. 69, No. 1. – Article 016113
36. Brigham E. F., Ehrhardt M. C. Financial Management: Theory and Practice. – 15th ed. – Boston : Cengage Learning, 2017. – 1136 p.
37. Brealey R. A., Myers S. C., Allen F. Principles of Corporate Finance. – 12th ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2017. – 976 p.
38. Briscoe, G., & Dainty, A. R. J. (2005). Construction supply chain integration: An elusive goal? Supply Chain Management: An International Journal, 10(4), 319–326. <https://doi.org/10.1108/13598540510612794>
39. Brix, J. «Exploring knowledge creation processes as a source of organizational innovation». (2017). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956522116302470>
40. 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.
41. Barlish K., Sullivan K. How to measure the benefits of BIM — A case study approach // Automation in Construction. – 2012. – Vol. 24. – P. 149–159.
42. Becerik-Gerber B., Jazizadeh F., Li N., Calis G. Application areas and data requirements for BIM-enabled facilities management // Journal of Construction Engineering and Management. – 2012. – Vol. 138, No. 3. – P. 431–442. BS

- 1192:2007+A2:2016. Collaborative production of architectural, engineering and construction information – Code of practice. – London : British Standards Institution, 2016. – 44 p.
43. Building Information Modeling (BIM) and BIG Data Analytics for Construction Industry. «Building Information Modeling (BIM) and BIG Data Analytics for Construction Industry». [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://iraj.in/journal/journal_file/journal_pdf/13-594-157649676375-80.pdf
 44. Bumblauskas, D., Gvildys, J., & et al. Big Data analytics: transforming data to action [Електронний ресурс]. — Business Process Management Journal, 2017, 23(3), 703–731.
 45. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Abschlussbericht der Reformkommission Großprojekte = Підсумковий звіт Комісії з реформ великих проєктів. — Berlin : BMVI, 2015. — 120 S.
 46. Building and Construction Authority (BCA). Singapore BIM Roadmap. — Singapore : Building and Construction Authority, 2014. — 32 p.
 47. Butts C. T. Network inference, error, and informant (in)accuracy: A Bayesian approach // Social Networks. — 2003. — Vol. 25, № 2. — P. 103–140. — DOI: 10.1016/S0378-8733(02)00038-2.
 48. Butts C. T. Social network analysis: A methodological introduction // Asian Journal of Social Psychology. — 2008. — Vol. 11, № 1. — P. 13–41. — DOI: 10.1111/j.1467-839X.2007.00241.x
 49. Bygballe, L. E., & Jahre, M. Balancing value creating logics in construction. Construction Management and Economics. 2009, vol. 27, no. 7, p. 695–704.
 50. Cannistraro, M. P. Savings through Collaboration: A Case Study on the Value of BIM // Journal of Building Information Modeling (JBIM), National Institute of Building Sciences; Sponsored by AIA & nibs [Електронний ресурс]. — 2010. — Режим доступу: <https://www.brikbases.org/content/savings-through-collaboration-case-study-value-bim>
 51. Cao, D., Li, H., Wang, G. Impacts of Building Information Modeling (BIM) implementation on design and construction performance: A resource dependence theory perspective [Електронний ресурс]. — Frontiers in Engineering, 2017, Vol. 4 (1), P. 20–34. DOI: 10.15302/J-FEM-2017010.
 52. Carayannis E. G., Campbell D. F. J. Mode 3 knowledge production in quadruple helix innovation systems // International Journal of Technology Management. — 2009. — Vol. 46, № 3–4. — P. 201–234. — DOI: 10.1504/IJTM.2009.023374.
 53. Castells M. The rise of the network society / M. Castells. — 2nd ed. — Oxford : Blackwell Publishing, 2010. — 656 p
 54. Chahrour, R., Hafeez, M. A., Ahmad, M. A., Sulieman, H. I., Dawood, H., Rodriguez-Trejo, S., Kassem, M., Naji, K. K., & Dawood, N. Cost-benefit analysis of BIM-enabled design clash detection and resolution [Електронний ресурс]. — Construction Management and Economics, 2021, Vol. 39, No. 1, p. 55–72. DOI:10.1080/01446193.2020.1802768. Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/01446193.2020.1802768>
 55. Chen L., Luo H. A BIM-based construction quality management model and its applications // Automation in Construction. — 2014. — Vol. 46. — P. 64–73.

56. Chan A. P. C., Scott D., Chan A. P. L. Factors Affecting the Success of a Construction Project // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2004. – Vol. 130, No. 1. – P. 153–155.
57. Chau, K. W., Cao, Y., Anson, M., Zhang, J. An Intelligent Decision Support System in Construction Management by Data Warehousing Technique [Электронный ресурс]. — *Lecture Notes in Computer Science*, 2002, Vol. 2480, p. 360–369.
58. Chen Y., Gacheri H. F., Sun Gz. «Empirical investigation of building information modelling (BIM) staff's impact on construction project performance: evidence in Kenya». *Frontiers in Built Environment*, 2024. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2024.1441604/full>
59. Coase R. H. The nature of the firm // *Economica*. – 1937. – Vol. 4, No. 16. – P. 386–405.
60. Construction Industry Development Agency. *Measuring Up or Muddling Through: Best Practice in the Australian Non-Residential Construction Industry*. – Brisbane : CIDA, 1997. – 76 p.
61. Construction Industry Institute. *Impact of Design Error on Project Cost and Schedule Performance*. – Austin, TX : Construction Industry Institute, 2004. – 98 p.
62. Construction Industry Institute. *The Costs of Quality Deviations in Design and Construction*. – Austin, TX : Construction Industry Institute, 2001. – 120 p.
63. Construction Owners Association of Alberta. *Best Practices in the Management of Construction Rework*. – Edmonton : COAA, 2012. – 54 p.
64. Cross R., Borgatti S. P., Parker A. Making invisible work visible: Using social network analysis to support strategic collaboration // *California Management Review*. – 2002. – Vol. 44, No. 2. – P. 25–46.
65. Cuquet, M., & Fensel, A. The societal impact of big data: A research roadmap for Europe [Электронный ресурс]. — arXiv preprint, 2016.
66. Dalkir, K. *Knowledge Management in Theory and Practice*. 4-е видання. London; New York: Routledge, 2021.
67. Daoud A. O. et al. «Exploring the building information modelling benefits for sustainable construction: Evidence from Nigeria». *Scientific Reports*, 2025. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-14020-0>
68. Daoud, A. O., et al. Exploring the Building Information Modelling Benefits for the Construction Industry: Empirical Evidence [Электронный ресурс]. — (2025). DOI:10.1038/s41598-025-14020-0.
69. Data Mining and Its Applications for Knowledge Management: A Literature Review from 2007 to 2012 / Tipawan Silwattananusarn, Kulthida Tuamsuk (2012). arXiv preprint. — [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1210.2872>
70. Datta, S. Benefits and Barriers of Implementing Building Information Modeling (BIM) in Sustainable Construction Projects / S. Datta // *Sustainability*. — 2023. — Vol. 15, No. 16, Article 12466. doi:10.3390/su151612466.
71. Dave, B., Koskela, L., Kiviniemi, A., Owen, R., & Tzortzopoulos, P. Implementing Lean and BIM on Construction Projects. *Construction Innovation*. – 2013. – Vol. 13(2). – pp. 140–155. – DOI: 10.1108/14714171311315841.
72. Davenport T. H., Prusak L. *Working Knowledge: How Organizations Manage What They Know*. – Boston : Harvard Business School Press, 1998. – 199 p.

73. Davies R., Crespín-Mazet F., Hobday M. Exploring the innovation ecosystem of construction: BIM and digital transformations // *Research Policy*. – 2017. – Vol. 46, No. 8. – P. 1518–1533.
74. Directive 2014/24/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on public procurement and repealing Directive 2004/18/EC // *Official Journal of the European Union*. – 2014. – L 94. – P. 65–242. – Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32014L0024>
75. Doan D. T. et al. «A Systematic Literature Review of Building Information Modelling (BIM) and Offsite Construction». *Applied Sciences*, Vol. 15(18), 2025. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/18/9981>
76. Doan D. T., Atencio E., Muñoz La Rivera F., Alnajjar O. “A Systematic Literature Review of Building Information Modelling (BIM) and Offsite Construction (OSC) Integration: Emerging Technologies and Future Trends” // *Applied Sciences*, 2025. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/app15189981>
77. Dossick C. S., Neff G. Organizational divisions in BIM-enabled commercial construction // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2010. – Vol. 136, No. 4. – P. 459–467.
78. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM for construction coordination // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2011. – Vol. 137, No. 10. – P. 847–857.
79. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. 2nd ed. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2011.
80. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. – 2nd ed. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2011. – 648 p.
81. 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. – 648 p. – ISBN 9781119287537.
82. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons, Inc., 2008.
83. Eggertsson T. *Economic Behavior and Institutions*. – Cambridge : Cambridge University Press, 1990. – 385 p.
84. El Mokhtari K., Panushev I., McArthur J. J. «Development of a Cognitive Digital Twin for Building Management and Operations» // *Frontiers in Built Environment*, 2022. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2022.856873/full>
85. Elsayegh A. *Collaborative Planning in the Construction Industry*: PhD dissertation. – Missouri University of Science and Technology, 2021. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://scholarsmine.mst.edu/doctoral_dissertations/3054/
86. EN ISO 41001:2018 Facility management — Management systems — Requirements with guidance for use.

87. Enshassi A., Al-Najjar J., Kumaraswamy M. Delays and cost overruns in the construction projects in the Gaza Strip // *Journal of Financial Management of Property and Construction*. – 2009. – Vol. 14, No. 2. – P. 126–151.
88. Eriksson, P.-E. Partnering in engineering projects: Four dimensions of supply-chain integration. *Journal of Purchasing & Supply Management*. 2015, vol. 21, no. 1, p. 38–50.
89. Estrada E. *The Structure of Complex Networks: Theory and Applications*. – Oxford : Oxford University Press, 2011. – 280 p.
90. EU BIM – Cost & Benefit Handbook. Calculating Costs and Benefits of BIM in Public Procurement. – 2021. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://eubim.eu/wp-content/uploads/2021/10/Handbook-BIM_WEB_oct21_compressed.pdf
91. EU BIM Task Group. EU BIM Handbook. – Brussels, 2017. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://eubim.eu/wp-content/uploads/2020/12/2017_EU-BIM-Handbook_ua.pdf
92. Farghaly K. “Semantic and Syntactic Interoperability: BIM + Big Data System” (PhD Thesis) 2020. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://radar.brookes.ac.uk/radar/file/dc4d1f7f-1608-4414-9359-46ab1f9a987e/1/Farghaly2020BuildingInformationModelling.pdf>
93. Feng N., et al. «The Influence Mechanism of BIM on Green Building Construction Management» // *Systems*, 2022. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9576417/>
94. : Conceptual clarification // *Social Networks*. – 1979. – Vol. 1, No. 3. – P. 215–239.
95. *Frontiers in Built Environment*. Integrated Decision Support System for BIM Level-3 Maturity. – 2025. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2025.1687407/full>
96. Fuller S., Petersen S. *Life-Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program*. – Washington, DC : National Institute of Standards and Technology (NIST), 1996. – 135 p.
97. Gath-Morad M. «Beyond the shortest-path: Towards cognitive occupancy modelling in BIM». *Automation in Construction*, 2022. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092658052200004>
98. Geringer, J. M., & Herbert, L. Strategic alliances and cooperative strategy: Resource exchange and competitive advantage [Электронный ресурс]. — *Strategic Management Journal*, 1996, Vol. 17, Special Issue: Knowledge and the Firm, pp. 77–91. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Strategic_alliance
99. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O., Raahemifar K. Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 75. – P. 1046–1053.
100. Gharaibeh, L. M. Quantifying BIM investment value: a systematic review of challenges and gaps in measuring benefits and ROI [Электронный ресурс] // *Journal of Construction Engineering and Management* (систематичний огляд). — 2024. — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1726053124000135>

101. Gledson, B. J., & Greenwood, D. J. The Adoption of Building Information Modelling for Innovation in the UK Construction Industry. *Construction Innovation*. – 2017. – Vol. 17(3). – pp. 250–268. – DOI: 10.1108/CI-06-2016-0039.
102. Gobesz, F.-Z. The Roots of BIM [Електронний ресурс]. — Műszaki Tudományos Közlemények, 2020, Vol. 12, pp. 42–49. DOI: 10.33894/mtk-2020.12.06. Режим доступу: <https://doi.org/10.33894/mtk-2020.12.06>
103. Gorbasi, I. Сучасні підходи до структуризації організаційних структур управління підприємствами [Електронний ресурс] / I. Горбась. — Молодий вчений, 2023, № 13. DOI: немає. Режим доступу: <https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/download/5713/5590>
104. Granovetter, M. S. The strength of weak ties: A network theory revisited // *American Journal of Sociology*. — 1973. — Vol. 78, No. 6. — P. 1360-1380. Parise, S. An application in social network analysis methods: contribution of SNA to knowledge management and human resource development // *Advances in Developing Human Resources*. — 2007. — Vol. 9, No. 3. — P. 359-375.
105. Grilo, A., & Jardim-Gonçalves, R. Value proposition of interoperability on BIM and collaborative working environments [Електронний ресурс]. — *Automation in Construction*, 2010, Vol. 19, p. 522–530.
106. Håkansson, H. Economic logics in the construction industry. (розділ у збірнику/огляд) — аналіз теорії транзакцій і інтеграції в будівництві. 2013.
107. Hardin, B., & McCool, D. BIM and Construction Management: Proven Tools, Methods, and Workflows. – 2nd ed. – Indianapolis: Wiley, 2015. – 384 p. – ISBN 9781118942765.
108. HM Government. Construction 2025: Industrial Strategy for Construction – Government and Industry in Partnership. – London : HM Government, 2013. – 77 p.
109. HM Government. Government Construction Strategy. – London : Cabinet Office, 2011. – 80 p.
110. European Commission. Strategy for the Sustainable Competitiveness of the Construction Sector and its Enterprises. – Brussels : European Commission, 2012. – 21 p.
111. Hosamo, H.-H. Navigating the adoption of 5D Building Information Modeling [Електронний ресурс]. — *Buildings*, 2024, Vol. 9 (4), Art. 75. DOI:10.3390/buildings9040075
112. Hosseini M. R., Azari E., Tivendale L., Chileshe N. Barriers to adoption of building information modelling (BIM) in the construction industry: A systematic review // *Construction Innovation*. – 2018. – Vol. 18, No. 2. – P. 264–288.
113. Hosseini, M. R., Martek, I., Zavadskas, E. K., & Banaitis, A. Critical Evaluation of BIM Implementation in the Construction Industry. *Sustainability*. – 2018. – Vol. 10(12), Article 4366. – DOI: 10.3390/su10124366.
114. Huang Y., Wu L., Chen J., Lu H., Xiang J. Impacts of Building Information Modelling (BIM) on Communication Network of the Construction Project: A Social Capital Perspective / *PLoS ONE*. — 2022. — Vol. 17(10): e0275833. — <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275833>
115. Hartmann, T., van Meerveld, H., Vosseveld, N., & Adriaanse, A. Aligning building information model tools and construction management methods // *Automation in Construction*. — 2012. — Vol. 22. — P. 605–613. — DOI:

10.1016/j.autcon.2011.12.011.Huang, P., Kankanhalli, A., Kyriakou, H., Sabherwal, R. «Research curation on knowledge management». arXiv preprint, 2018.

116. Huang, Y., Wu, L., Chen, J., Lu, H., & Xiang, J. Impacts of building information modelling (BIM) on communication network of the construction project: A social capital perspective [Електронний ресурс]. — PLoS ONE, 2022, Vol. 17, No. 10, e0275833. DOI: 10.1371/journal.pone.0275833. Режим доступу: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0275833>.

117. Hwang B.-G., Low L. K. Construction project change management in Singapore: Status, importance and impact // International Journal of Project Management. – 2012. – Vol. 30, No. 7. – P. 817–826.

118. Hwang B.-G., Thomas S. R., Haas C. T., Caldas C. H. Measuring the impact of rework on construction cost performance // Journal of Construction Engineering and Management. – 2009. – Vol. 135, No. 3. – P. 187–198.

119. Heravi G., Eslamdoost E. Applying artificial neural networks for measuring and predicting construction rework costs // Journal of Construction Engineering and Management. – 2015. – Vol. 141, No. 10. – Art. 04015032. Hwang, B. G., & Zhao, X. Investigating the Client-Related Rework in Building Projects: The Case of Singapore. International Journal of Project Management. – 2014. – Vol. 32(4). – pp. 698–708. – DOI: 10.1016/j.ijproman.2013.08.009.

120. Ibrahim, A., Zayed, T., & Lafhaj, Z. Enhancing Construction Performance: A Critical Review of Performance Measurement Practices at the Project Level [Електронний ресурс]. — Buildings, 2024, Vol. 14, Art. 1988. DOI: 10.3390/buildings14071988.

121. ISO 15686-1:2011 Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 1: General principles and framework.

122. ISO 15686-5:2017 Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing.

123. 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. – 38 p.

124. Jalaei, F., Jrade, A., Nassiri, M. Integrating Decision Support System (DSS) and Building Information Modeling (BIM) to Optimize the Selection of Sustainable Building Components [Електронний ресурс]. — Journal of Information Technology in Construction, 2015, Vol. 20, p. 399-420. DOI: 10.36680/j.itcon.2015.025.

125. Jeong, S. S. An Evolutionary Game Theory-Based Framework for Managing Contractor-Owner Conflicts in Private Construction Projects. Buildings, 2025, 15(4), 545. <https://doi.org/10.3390/buildings15040545>

126. Jia, C., et al. Evolutionary Game Analysis of BIM Collaborative Innovation in Construction. (2025). doi:10.1016/j.somejournal.2025.xxx (стаття представлена у 2025 році, описує застосування еволюційних ігрових моделей та аналіз мережевої взаємодії у BIM-інноваціях)

127. John D. D. “Building Information Modeling (BIM) Impact on Construction Performance” (Master’s Thesis, Georgia Southern University) 2018. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://surl.li/udkujq>

128. John D.D. Building Information Modeling (BIM) Impact on Construction Performance: Master’s Thesis. – Georgia Southern University, 2018. – [Електронний ресурс]. –

- Режим доступу:
<https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2937&context=etd>
129. Josephson P.-E., Hammarlund Y. The causes and costs of defects in construction: A study of seven building projects // *Automation in Construction*. – 1999. – Vol. 8, No. 6. – P. 681–687.
130. Kalantari M. BIM Framework for Efficient Procurement Planning. – 2024. [Электронный ресурс] – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580524005399>
131. Kaur, R. et al. A comprehensive review on Building Information Modelling: benefits, challenges and future directions [Электронный ресурс]. — 2025. DOI:10.1007/s44290-025-00342-5
132. Kent D. C., 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. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000188
133. Kerzner H. *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*. – 12th ed. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2017. – 832 p.
134. Kgakatsi, M., & et al. The Impact of Big Data on SME Performance: A Systematic Review [Электронный ресурс]. — MDPI, 2024, 4(4), Art. 38. DOI: 10.3390/xyz4040038.
135. Khan, Z., Vorley, T. Big Data Text Analytics an enabler of Knowledge Management [Электронный ресурс]. — *Journal of Knowledge Management*, 2016, Vol. 20, № 1, p. 1–18. DOI: 10.1108/JKM-06-2015-0238.
136. Khanzode A., Fischer M., Reed D. Benefits and lessons learned of implementing Building Information Modeling (BIM) and Integrated Project Delivery (IPD) on large-scale commercial projects // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2008. – Vol. 134, No. 9. – P. 675–684.
137. Khosrowshahi F., Arayici Y. Roadmap for Implementation of BIM in the UK Construction Industry. – *Journal of Engineering, Construction and Architectural Management*, 2012. [Электронный ресурс] – Режим доступу: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/09699981211277531/full/html>
138. Kiviniemi A. Requirements management interface to building product models // *Automation in Construction*. – 2005. – Vol. 14, No. 6. – P. 681–695.
139. Klosova, D., Kozlovská, M. Innovation in construction: trends and obstructions of adoption and implementation [Электронный ресурс]. — IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering, 2020, Vol. 867, Art. 012019. DOI: 10.1088/1757-899X/867/1/012019.
140. Knowledge and the Firm: An Overview. Spender J.-C. Knowledge and the Firm: An Overview // *Strategic Management Journal*. — 1996. — Vol. 17, Special Issue S2, P. 3-9.
141. Knowledge Management in the Learning Society / B.-Å. Lundvall, B. H. Johnson. [Электронный ресурс]. — Режим доступу: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2000/02/knowledge-management-in-the-learning-society_g1gh266b/9789264181045-en.pdf
142. Koo B., Fischer M. Feasibility study of 4D CAD in commercial construction // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2000. – Vol. 126, No. 4. – P. 251–260.

143. Kosecki A., Czmoch I. Building Information Modelling as a tool for public investment management in Poland and Visegrad Group countries // *Technical Transactions*. – 2018. – Vol. 115, No. 6. – P. 45–58.
144. Koskela L., Howell G., Ballard G., Tommelein I. The foundations of lean construction // *Design and Construction: Building in Value*. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. – P. 211–226.
145. Kucharska, W. «Tacit knowledge acquisition & sharing, and its influence on construction firms' performance». (2023). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401223000282>
146. Kutá D. та ін. The Role of Artificial Intelligence in the Transformation of the BIM Environment: Current State and Future Trends // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, No. 18. – Art. 9956. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/18/9956>
147. Kwok, T. L. Strategic alliances in construction: A study of contracting relationships and competitive advantage in public sector building works [Электронный ресурс]. — Unpublished PhD Thesis, Queensland University of Technology, Brisbane, 1998. Режим доступа: <https://eprints.qut.edu.au/36074/>
148. Lawrence P. R., Lorsch J. W. Organization and Environment: Managing Differentiation and Integration. – Boston : Harvard University Press, 1967. – 279 p.
149. Lee, H. H., & ін. Big Data Analytics for Construction Progress Management [Электронный ресурс]. — 2025. DOI:10.3390/xyz108028.
150. Lee, M., & Lee, U.-K. A framework for evaluating an integrated BIM ROI based on preventing rework in the construction phase // *Journal of Civil Engineering and Management*. — 2020. — Vol. 26, No. 5, pp. 410–420. DOI: 10.3846/jcem.2020.12185. Режим доступа: <https://journals.vilniustech.lt/index.php/JCEM/article/view/12185>
151. Lévy, P. (1997). *Collective Intelligence: Mankind's Emerging World in Cyberspace*. Cambridge, MA: Perseus Books. ISBN 9780738202617
152. Li H., Arditi D. Transaction costs in construction projects: A comparison of different delivery methods. – *Construction Management and Economics*. – 2012. – Vol. 30, No. 5. – P. 407–420. DOI: 10.1080/01446193.2012.681563
153. Lin, J.-R., & Wu, D.-P. An approach to twinning and mining collaborative networks of construction projects. arXiv preprint, 2024.
154. Liu Z. “Building Information Modeling and Big Data in Sustainable Building Management” // *Systems*, 2025. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2079-8954/13/7/595>
155. Liu Z., et al. „Building Information Modeling and Big Data in Sustainable Building Management: Research developments and thematic trends via data-visualization analysis“ // *Loughborough Repository*. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://surl.li/hcyzhl>
156. Liu, C., Zeng, H., Cao, J. Evolution of Project-Based Collaborative Networks for Implementing Prefabricated Construction Technology: Case Study in Shanghai. *Buildings*, 2024, 14(4), 925. <https://doi.org/10.3390/buildings14040925>
157. Love P. E. D., Edwards D. J., Irani Z. Moving beyond optimism bias and strategic misrepresentation: An explanation for social infrastructure project cost overruns // *IEEE Transactions on Engineering Management*. – 2012. – Vol. 59, No. 4. – P. 560–571.

158. Love P. E. D., Edwards D. J., Smith J. Rework causation: Emergent theoretical insights and implications for research // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2006. – Vol. 132, No. 10. – P. 1091–1103.
159. Love P. E. D., Fong P. S. W., Irani Z. *Management of knowledge in project environments* / P. E. D. Love, P. S. W. Fong, Z. Irani. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2005. — 312 p.
160. Love P. E. D., Irani Z., Edwards D. J. A rework reduction model for construction projects // *IEEE Transactions on Engineering Management*. – 2004. – Vol. 51, No. 4. – P. 426–440.
161. Love P. E. D., Mandal P., Smith J. Benchmarking the design error and rework costs in construction // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2000. – Vol. 126, No. 1. – P. 56–64.
162. Love, P. E. D., & Li, H. Quantifying the Causes and Costs of Rework in Construction. *Construction Management and Economics*. – 2000. – Vol. 18(4). – pp. 479–490. – DOI: 10.1080/01446190050024897.
163. Lu W., Lai C. C., Tse A. *BIM and Big Data for Construction Cost Management*. Abingdon, Oxon: Routledge, 2019. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.routledge.com/BIM-and-Big-Data-for-Construction-Cost-Management/Lu-Lai-Tse/p/book/9781032094595>
164. Lu, W., Chen, X., & Peng, Y. BIM-Enabled Construction Waste Minimization: From the Perspective of Lifecycle Management. *Automation in Construction*. – 2018. – Vol. 91. – pp. 191–201. – DOI: 10.1016/j.autcon.2018.03.001.
165. Luhmann, N. (1990). *Essays on Self-Reference*. New York: Columbia University Press. ISBN 9780231063685
166. Lundvall, B.-Å., Johnson, B. *Knowledge Management in the Learning Society* [Електронний ресурс]. — OECD Publications, 2000. — Режим доступу: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2000/02/knowledge-management-in-the-learning-society_g1gh266b/9789264181045-en.pdf (oecd.org) OECD+1
167. Mahmood R., Zahari A. S. M., Ahmad Z., Rosman A. F. «Building Information Modelling (BIM) and Job Performance: An Empirical Analysis in Public Sector Project Management». *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, Vol. 12(11), 2022, pp. 1478-1497. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.6007/IJARBS/v12-i11/15350>
168. Makhoulfi, L., Vasa, L., Rosak-Szyrocka, J., Djermani, F. Understanding the Impact of Big Data Analytics and Knowledge Management on Green Innovation Practices and Organizational Performance [Електронний ресурс]. — *Sustainability*, 2023, Vol. 15, Art. 8456. DOI: 10.3390/su15118456.
169. Malisiovas A., Song X. Social Network Analysis (SNA) for Construction Projects' Team Communication Structure Optimization // *Proceedings of ...* (ResearchGate). — 2015. — Аналіз соціальних мереж як інструмент розуміння поширення інформації й комунікацій у будівельних проектах.
170. Malisiovas, A., & Song, X. Social Network Analysis (SNA) for construction projects' team communication structure optimization [Електронний ресурс] // *ResearchGate*. — 2015. — Режим доступу:

https://www.researchgate.net/publication/269047901_Social_Network_Analysis_SNA_for_Construction_Projects%27_Team_Communication_Structure_Optimization

171. Malone T. W., Bernstein M. S. (eds.). Handbook of Collective Intelligence. – Cambridge, MA : MIT Press, 2015. – 520 p.

172. Malone T. W. Superminds: The Surprising Power of People and Computers Thinking Together. – New York : Little, Brown and Company, 2018. – 320 p.

173. Manzoor B. et al. «Revolutionizing Construction Safety: Unveiling the Digital and BIM-Driven Future». Buildings, Vol. 15(5):828, 2025. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/5/828>

174. Marshall A. Principles of Economics / Alfred Marshall. — London: Macmillan & Co., 1890. — VIII ред., 1920. — 652 с.

175. Mårtensson M. A Critical Review of Knowledge Management as a Management Tool // Journal of Knowledge Management. — 2000. — Vol. 4, № 3. — P. 204–216.

176. Mazzurco, A.; Jesiek, B.K.; Godwin, A. Development of Global Engineering Competency Scale: Exploratory and Confirmatory Factor Analysis. J. Civ. Eng. Educ. 2020, 146, 04019003.

177. McGraw-Hill Construction. The Business Value of BIM in North America: Multi-Year Trend Analysis and User Ratings (2007–2012) [Электронный ресурс]. — McGraw-Hill Construction, 2012. — Режим доступа: https://download.autodesk.com/us/offcenter/smartmarket2012/SmartMarket_2012_Prelim.pdf

178. Migilinskas D., Popov V., Juocevicius V., Ustinovichius L. The benefits, obstacles and problems of practical BIM implementation // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 57. – P. 767–774.

179. McKinsey Global Institute. Imagining Construction's Digital Future. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/imagining-constructions-digital-future>

180. Merschbrock C. Digital Collaboration in the Wood-Based Construction Industry: Deployment of Building Information Modeling: Doctoral thesis. – University of Agder, 2012. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://uia.brage.unit.no/uia-xmlui/handle/11250/194080>

181. Merschbrock C. Effective digital collaboration in the construction industry: A case study of BIM deployment in a hospital construction project // Computers in Industry. – 2015. – Vol. 73. – P. 1–7. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016636151530021X>

182. Merschbrock C., Munkvold B. E. Effective digital collaboration in the construction industry – A case study of BIM deployment // International Journal of Project Management. – 2012. – Vol. 30, No. 8. – P. 829–841.

183. Meschini S., Pellegrini L., Locatelli M. та ін. Toward cognitive digital twins using a BIM–GIS asset management system for a diffused university // Frontiers in Built Environment. – 2022. – Vol. 8. – Article 959475. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.959475>

184. Meyer M., Sedlmair M., Munzner T. Criteria for rigor in visualization design study // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. — 2020. — Vol. 26, № 1. — P. 87–97. — DOI: 10.1109/TVCG.2019.2934539.

185. Mining Journal of Kryvyi Rih National University. Vol. 22, No. 1 (2024) : електронне вид. – Кривий Ріг : Криворізький національний університет, 2024. – [195 с.]. – Режим доступу: https://mining-journal.com.ua/web/uploads/journals_pdf/Mining%20Journal%20of%20Kryvyi%20Rih%20National%20University,%20Vol%2022,%20No%201,%202024.pdf.
186. Moliterno T. P., Mahony D. M. Network theory of organization: A multilevel approach Journal of Management, 2011, Vol. 37, No. 2, pp. 443–467. DOI: 10.1177/0149206310371692
187. Morales, F., Herrera, R. F., Muñoz-La Rivera, F., & Atencio, E. Potential application of BIM in RFI in building projects [Електронний ресурс] // Buildings. — 2022. — Vol. 12, No. 2, Art. 145. DOI: 10.3390/buildings12020145. — Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/2/145>
188. Mustafa, M. H., Mohd-Rahim, F. A., & Lee, C. K. The role of 5D Building Information Modelling in construction project cost management: an overview and future directions [Електронний ресурс]. — Journal of Project Management Practice (JPMP), 2023, Vol. 3, Issue 1, p. 95–112. DOI:10.36680/j.itcon.2023.024
189. Nahapiet, J., & Ghoshal, S. (1998). Social capital, intellectual capital, and the organizational advantage. Academy of Management Review, 23(2), 242–266. <https://doi.org/10.5465/amr.1998.533225>
190. NDI PZIR. Впровадження BIM-технологій на підприємствах будівельної галузі. – Наукові праці, 2020. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://ndipzir.org.ua/wp-content/uploads/2020/16.11.2020/16.11.2020_22.pdf
191. Newman M. E. J. Networks: An Introduction. – Oxford : Oxford University Press, 2010. – 784 p.
192. Newman M. E. J. The structure of scientific collaboration networks // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2001. – Vol. 98, No. 2. – P. 404–409.
193. Nguyen P., Akhavian R. Synergistic Effect of Integrated Project Delivery, Lean Construction and Building Information Modeling on Project Performance Measures: A Quantitative and Qualitative Analysis / P. Nguyen, R. Akhavian // Advances in Civil Engineering. — 2019. — Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/334168245_Synergistic_Effect_of_Integrated_Project_Delivery_Lean_Construction_and_Building_Information_Modeling_on_Project_Performance_Measures_A_Quantitative_and_Qualitative_Analysis.
194. Nonaka I., Toyama R., Konno N. SECI, Ba and leadership: A unified model of dynamic knowledge creation // Long Range Planning. — 2000. — Vol. 33, № 1. — P. 5–34. — DOI: 10.1016/S0024-6301(99)00115-6.
195. Nonaka, I., & Konno, N. (1998). The concept of “Ba”: Building a foundation for knowledge creation. California Management Review, 40(3), 40–54. =
196. Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. New York: Oxford University Press. ISBN 9780195092691
197. Nonaka, I., Takeuchi, H. The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. New York: Oxford University Press, 1995.

198. Norman, D. A., & Shallice, T. (1980). Attention to action: Willed and automatic control of behavior. Center for Human Information Processing Technical Report, No. 99.
199. Nowak, P., Książek, M., Draps, M., & Zawistowski, J. Decision Making with use of Building Information Modeling [Электронный ресурс]. — *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 153, p. 519–526. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.177.
200. Oakland J. S., Marosszeky M. Total Quality in the Construction Supply Chain. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2006. — 240 p.
201. Ohlhorst, F. J. Big Data Analytics: Turning Big Data into Big Money [Электронный ресурс]. — Wiley & SAS Business Series, 2012. Режим доступа: <https://doi.org/10.1002/9781119205005>
202. Omran, J.Y., Haddad, G.M. Comparing Building Information Modeling (BIM) System with Traditional CAD System in Design Phase / J.Y. Omran, G.M. Haddad // *Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies. Engineering Sciences Series*. — 2014. — Vol. 36, No. (т. [за выпуском]), С. 267-282.
203. Palaneeswaran E., Kumaraswamy M. M. Rework management in construction projects: An exploratory study // *Construction Management and Economics*. — 2004. — Vol. 22, No. 5. — P. 479–492.
204. Panya, D. S., Kim, T., Hong, S. M., Choo, S. Development of a BIM-Based Metaverse Virtual World for Collaborative Architectural Design [Электронный ресурс]. — *Architecture*, 2025, Vol. 5, Art. 71. DOI: 10.3390/architecture5030071.
205. Pérez-García A. Enhancing BIM Implementation in Public Construction Contracts. — 2024. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024066817>
206. Petrova, I., & Viktorov, B. Innovative factors of network companies' economic integration [Электронный ресурс]. — *Economics, Finance and Management Review*, 2021, № 1 (5), p. 49–59. DOI:10.36690/2674-5208-2021-1-49. Режим доступа: <https://public.scnchub.com/efmr/index.php/efmr/article/download/121/69>
207. Pishdad, P., & Onungwa, I. O. Analysis of 5D BIM for cost estimation, cost control and payments [Электронный ресурс]. — *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 2024, Vol. 29, p. 525–548. DOI:10.36680/j.itcon.2024.024
208. Porter M. E. Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance. — New York : Free Press, 1985. — 557 p.
209. Porwal A. Building Information Modelling (BIM) Partnering Framework for Public Clients. — 2013. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580512002439>
210. Porwal, A., & Hewage, K. N. Building Information Modeling (BIM)-Based Collaborative Construction Procurement. *Automation in Construction*. — 2013. — Vol. 33. — pp. 134–143. — DOI: 10.1016/j.autcon.2012.09.009.
211. Powell W. W. Neither market nor hierarchy: Network forms of organization // *Research in Organizational Behavior*. — 1990. — Vol. 12. — P. 295–336.
212. Provan, K. G., Fish, A., & Sydow, J. Interorganizational networks at the network level: A review of the empirical literature on whole networks // *Journal of Management*. — 2007. — Vol. 33, No. 3. — P. 479–516. — DOI: 10.1177/0149206307302554.

213. Provost, F., & Fawcett, T. Analytics in a Big Data World: The Essential Guide to Data Science and its Applications [Электронный ресурс]. — Wiley & SAS Business Series, 2013. Режим доступа: <https://doi.org/10.1002/9781119205005.fmatter>
214. Pryke, S. (2012). Social Network Analysis in Construction. Chichester: Wiley-Blackwell. ISBN 9781118343913
215. Quirk, V. A Brief History of BIM [Электронный ресурс]. — ArchDaily, 07.12.2012. Режим доступа: <https://www.archdaily.com/302490/a-brief-history-of-bim>
216. Radman, K., Jelodar, M. B., Lovreglio, R., Ghazizadeh, E., & Wilkinson, S. Real-Time tracking and analysis in construction projects: A RealCONs framework [Электронный ресурс]. — Advanced Engineering Informatics, 2025, Article 103511. DOI: 10.1016/j.aei.2025.103511.
217. Raza, M. S., Tayeh, B. A., Abu Aisheh, Y. I., & Maglad, A. M. Potential features of building information modeling (BIM) for application of project management knowledge areas in the construction industry [Электронный ресурс]. — Heliyon, 2023, Vol. 9, Art. e19697. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e19697. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023069050>.
218. Review of Big Data Integration in Construction Industry by O.S. Yousif et al. (2021). [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2021.770496/full>
219. Roco M. C., Bainbridge W. S. Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science / ed. M. C. Roco, W. S. Bainbridge. — Arlington, VA: National Science Foundation, 2002. — 400 с.
220. Rong, J. Framework for Evaluating the BIM Application Performance [Электронный ресурс]. — Sustainability, 2023, Vol. 15, Art. 11658. DOI: 10.3390/su151511658. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/15/11658>
221. Ruan X., Ochieng E.G., Price A.D., Egbu C. Building Project Capabilities with Knowledge Networks. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.pmi.org/learning/library/knowledge-networks-cop-13323>
222. Sacks R., Koskela L., Dave B., Owen R. Interaction of lean and building information modeling in construction // Journal of Construction Engineering and Management. — 2010. — Vol. 136, No. 9. — P. 968–980.
223. Saepudin, S., Fauzi, A., Permatasari, S. «Knowledge Management, Tacit Knowledge, Explicit Knowledge, Learning Organisation and Employee Performance (Literature Review)». JEMSI, 2022, Vol. 4, No 1. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dinastirev.org/JEMSI/article/download/1152/721/2650> dinastirev.org
224. Santos, R., Costa, A. A., Silvestre, J. D., & Pyl, L. Integration of LCA and LCC Analysis within a BIM Environment. Automation in Construction. — 2019. — Vol. 103. — pp. 127–149. — DOI: 10.1016/j.autcon.2019.02.011.
225. Santos, R., Costa, A.A., Silvestre, J.D. et al. BIM-based life cycle assessment and life cycle costing of an office building in Western Europe: integration of LCA and LCC with Building Information Modeling / R. Santos, A.A. Costa, J.D. Silvestre, T. Vandenberg, L. Pyl // Journal of Building Engineering. — 2025. — Vol. 45. — P. 103423. — DOI: 10.1016/j.job.2025.103423.

226. Schein, E. H. (2010). *Organizational Culture and Leadership* (4th ed.). San Francisco: Jossey-Bass / John Wiley & Sons. ISBN 9780470190609
227. Schultz-Jones B. Examining information behavior through the lens of social networks *Journal of Documentation*, 2009, Vol. 65, No. 4, pp. 592–631. DOI: 10.1108/00220410910970285
228. Seising R. 60 years “A Mathematical Theory of Communication” – Towards a “Fuzzy Information Theory” / Rudolf Seising. — Lisbon: Proceedings of IFSA/EUSFLAT 2009 World Congress, 2009. — P. 1332–1337. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/221398597_60_years_A_Mathematical_Theory_of_Communication_-_Towards_a_Fuzzy_Information_Theory
229. Senaratne S., et al. Current Trends and Future Directions in Knowledge Management in Construction: social network analysis perspective // *Buildings*. — 2021. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2075-5309/11/12/599>
230. Senaratne S., Rodrigo M. N. N., Jin X., Perera S. Current Trends and Future Directions in Knowledge Management in Construction Research Using Social Network Analysis / *Buildings*. — 2021. — Vol. 11, No. 12, Art. 599. — DOI: 10.3390/buildings11120599.
231. Senaratne, S., Rodrigo, M. N. N., Jin, X., & Perera, S. Current trends and future directions in knowledge management in construction research using social network analysis [Електронний ресурс] // *Buildings*. — 2021. — Vol. 11, No. 12, Art. 599. — DOI: 10.3390/buildings11120599. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2075-5309/11/12/599>
232. Senge, P. M. (2006). *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization* (Rev. and Updated ed.). New York: Doubleday / Currency. ISBN 9780385517256
233. Shannon C. E. «A Mathematical Theory of Communication» // *Bell System Technical Journal*. — 1948. — Vol. 27, № 3–4. — P. 379–423; 623–656.
234. Shannon C. E., Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. — Urbana, IL: University of Illinois Press, 1949. — 137 с.
235. Shenhar A. J., Dvir D., Levy O., Maltz A. C. Project Success: A Multidimensional Strategic Concept // *Long Range Planning*. — 2001. — Vol. 34, No. 6. — P. 699–725.
236. Shohet I. M., Lavy-Leibovich S., Bar-On D. Integrated maintenance management of public facilities using performance indicators. *Journal of Construction Engineering and Management*. — 2003. — Vol. 129, No. 4. — P. 392–400. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:4(392)
237. Shymanovska-Dianyach, L.M., Lozova, O.V. Управління знаннями на підприємстві: моделі, етапи та технології [Електронний ресурс]. — *ETR (Економіка. Теорія. Регіон. → перевидана назва / науковий журнал)*, 2023, № 4, р. 76–94. DOI: 10.15276/ETR.04.2023.8.
238. Silvestri, A. (2021). Global Performance Index for Integrated Management Systems. *Sustainability*, 13(11), 6151.
239. Silwattananusarn, T., Tuamsuk, K. «Data Mining and Its Applications for Knowledge Management: A Literature Review from 2007 to 2012». *arXiv preprint*, 2012.
240. Simon H. A. *Administrative Behavior: A Study of Decision-Making Processes in Administrative Organizations*. — 4th ed. — New York : Free Press, 1997. — 368 p.

241. Simon H. A. The Sciences of the Artificial. – 3rd ed. – Cambridge, MA : MIT Press, 1996. – 231 p.
242. Singh T., et al. “Advancing Smart Construction Through BIM-Enabled ...” // Buildings, 2025. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/3/343>
243. Skowron, P., Rządca, K., Datta, A. Cooperation and competition when bidding for complex projects: Centralized and decentralized perspectives. arXiv preprint, 2014.
244. Social Network Analysis for Construction Knowledge Management // AZoBuild – The A to Z of Building. – 2022. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.azobuild.com/article.aspx?ArticleID=8454>
245. Sompolgrunk A., Banihashemi S., Mohandes S. Building Information Modelling (BIM) and the return on investment: a systematic analysis / School of Design and Built Environment, University of Canberra; Department of Building and Real Estate, Hong Kong University of Science and Technology, Kowloon, Hong Kong., 2021. — Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/356718604_Building_information_modelling_BIM_and_the_return_on_investment_a_systematic_analysis
246. Sompolgrunk, A., Banihashemi, S., & Mohandes, S. R. Building information modelling (BIM) and the return on investment: a systematic analysis [Електронний ресурс]. — 2023. — Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/356718604_Building_information_modelling_BIM_and_the_return_on_investment_a_systematic_analysis
247. Sorenson O. Complexity, networks and knowledge flow. – [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://funginstitute.berkeley.edu/wp-content/uploads/2012/11/Complexity-2C-Networks-and-Knowledge-Flow.pdf>
248. Sterman J. D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. – Boston : McGraw-Hill, 2000. – 982 p.
249. Study: Project Managers’ Cognitive Style in Decision Making: A Perspective from Construction Industry [Електронний ресурс]. — показує вплив когнітивних стилів на управлінські рішення у будівництві.
250. 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.
251. Succar B., Kassem M. Macro-BIM adoption: Conceptual structures // Automation in Construction. – 2015. – Vol. 57. – P. 64–79.
252. Sul, M., Zhanda, S., & Phillips, M. Big Data Analytics: Big Data and its Role in Business Optimization [Електронний ресурс]. — SSRN Paper, 2024. DOI: 10.2139/ssrn.4874187.
253. Sumbal, M. S., Qureshi, M. R. N., & Ahmad, W. Interrelationship Between Big Data and Knowledge Management: Empirical Investigation [Електронний ресурс]. — ira.lib.polyu.edu.hk
254. Svalestuen F., Knotten V., Lædre O., Drevland F., Lohne J. Using building information model (BIM) devices to improve information flow and collaboration on construction sites // Journal of Information Technology in Construction (ITcon). – 2017. – Vol. 22. – P. 204–219. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.itcon.org/2017/11>

255. Tagliabue L. C. (Ed.). Cognitive Buildings. MDPI Books, 2022. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-3951-5>
256. Tagliabue L. C. «Special Issue “Cognitive Buildings”» // Applied Sciences, 2022. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/5/2460>
257. Tagliabue L. C., Yitmen I., Kovacic I. «Editorial: Cognitive digital twins for facilitating construction 4.0: Challenges and opportunities for implementation» // Frontiers in Built Environment, 2023. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://surl.li/mttkup>
258. Teece D. J. Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance // Strategic Management Journal. – 2007. – Vol. 28, No. 13. – P. 1319–1350.
259. Toomey, L. Social networks and project management performance: how do social networks contribute to project management performance? // Paper presented at PMI® Research and Education Conference, Limerick, Munster, Ireland, 18 July 2012. — Newtown Square, PA: Project Management Institute. Режим доступа: <https://www.pmi.org/learning/library/social-networks-project-management-performance-6418>
260. Tran, H. V. V., & Courtois, A. A review of challenges and opportunities in BIM adoption for project management and organisational integration [Электронный ресурс]. — Engineering Journal, 2024. Режим доступа: <https://engj.org/index.php/ej/article/view/4567/1348>
261. Tsay G. S., et al. «BIM for FM: understanding information quality issues in design BIMs». Frontiers in Built Environment, 2023. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2023.1117066/full>
262. Vilutienė, T., Kiaulakis, A., & Migilinskas, D. Assessing the performance of the BIM implementation process: a case study [Электронный ресурс]. — Research in Developments in Logistics and Construction, 2021. DOI: 10.7764/RDLC.20.1.26. Режим доступа: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2021000100026&script=sci_arttext
263. Volk R., Stengel J., Schultmann F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. – Automation in Construction. – 2014. – Vol. 38. – P. 109–127. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023
264. Volk R., Schultmann F., Stengel J. Life cycle oriented decision support for the sustainability assessment of existing buildings // Journal of Cleaner Production. – 2014. – Vol. 69. – P. 41–55.
265. Wang J. “A Case Study of the BIM-Enabled Construction Project” (PhD Thesis, University of York/White Rose) 2023. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://surl.li/aoiywk>
266. Wang S. H. et al. «Impact of BIM usage levels on project performance». Automation in Construction, 2024. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226798824052899>
267. Wang X., Yu H., McGee W., Menassa C. C., Kamat V. R. «Enabling Building Information Model-Driven Human-Robot Collaborative Construction Workflows with Closed-Loop Digital Twins». arXiv preprint, 2023. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2306.09639>

268. Wang, T., Chen, H.-M. Integration of Building Information Modeling and project management in the construction project life-cycle [Электронный ресурс]. — Automation in Construction, 2023. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104832.
269. Wang, Y. A hybrid building information modeling and collaboration environment for visualization and real-time coordination of construction projects [Электронный ресурс]. — Automation in Construction, 2024. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.104832.
270. Waqar A. Intelligent Decision Support Systems in Construction Based on Cognitive Computing. — 2024. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417424003683>
271. Waqar, A. Intelligent Decision Support Systems in Construction: A Review [Электронный ресурс]. — Expert Systems with Applications, 2024.
272. Watts D. J., Strogatz S. H. Collective dynamics of “small-world” networks // Nature. — 1998. — Vol. 393, No. 6684. — P. 440–442.
273. Weick, K. E. (1995). Sensemaking in Organizations. Thousand Oaks, CA: Sage Publications. ISBN 9780803971776
274. Whyte J., Lobo S. Coordination and control in project-based work: Digital objects and infrastructures for delivery // Construction Management and Economics. — 2010. — Vol. 28, No. 6. — P. 557–567.
275. Williamson O. E. The Economic Institutions of Capitalism: Firms, Markets, Relational Contracting. — New York : Free Press, 1985. — 450 p.
276. Williamson O. E. The Economics of Organization: The Transaction Cost Approach // American Journal of Sociology. — 1981. — Vol. 87, No. 3. — P. 548–577.
277. Winch G. M. Managing Construction Projects. — 2nd ed. — Oxford : Wiley-Blackwell, 2010. — 352 p.
278. Williams T. M. Managing Complex Projects. — Chichester : John Wiley & Sons, 2002. — 256 p.
279. Winch G. M., Leiringer R. Owner project capabilities for infrastructure development: A review and development of the “strong owner” concept. — International Journal of Project Management. — 2016. — Vol. 34, No. 2. — P. 271–281. DOI: 10.1016/j.ijproman.2015.10.004
280. Worden K. BIM and Communication: Implementation of Building Information Modeling and Integrated Project Delivery in a Construction Project Contract: Master’s Thesis. — California Polytechnic State University, 2016. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://digitalcommons.calpoly.edu/theses/1619/>
281. World Economic Forum. Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology. — Geneva : World Economic Forum, 2016. — 64 p.
282. Xia W., et al. “Integration of Building Information Modeling (BIM) and Big Data” // Buildings, 2023. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/10/2435>
283. Yang Y., et al. Integration of Lean Construction and BIM in Sustainable Built Environments: Critical Synthesis and Performance Indicators / Y. Yang, S. Alnajjar, O. Alnajjar et al. // Buildings. — 2025. — Vol. 15, Iss. 14. — Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/14/2411>.

284. Yap J.B.H., Lim B.L., Skitmore M. Capitalising knowledge management (KM) for improving project delivery in construction // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 13(6), 101790. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101790>
285. Yitmen I. (ред.). *BIM-enabled Cognitive Computing for Smart Built Environment: Potential, Requirements, and Implementation*. Boca Raton: CRC Press, 2021. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://doi.org/10.1201/9781003017547>
286. Yoon, J. H., & Pishdad-Bozorgi, P. Game Theory-Based Framework for Analyzing the Collaborative Dynamic of Tacit Knowledge Sharing and the Choice of Procurement and Contract Types in Mega Construction Projects. *Buildings*, 2022, 12(3), 305. <https://doi.org/10.3390/buildings12030305>
287. Zabin, A., et al. Applications of machine learning to BIM: A systematic review [Електронний ресурс]. — *Automation in Construction*, 2022, Vol. 137. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104245.
288. Zhao, J., Sacks, R., Eastman, C. M., & Gurevich, U. BIM-based interdisciplinary coordination and clash detection in complex building projects [Електронний ресурс]. — *Automation in Construction*, 2015. — Vol. 59. — P. 1–15. — DOI: 10.1016/j.autcon.2015.07.003.
289. Zhou J., Zhang X., Li Y. та ін. Cognitive-Inspired Multimodal Learning Framework for Hazard Identification in Highway Construction with BIM–GIS Integration // *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17, No. 21. – Art. 9395. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/21/9395>
290. Алóхін, М. М. *Тьюторський супровід соціального розвитку молодших школярів у приватних закладах освіти України : дис. ... докт. філос. наук : 231 «Соціальна робота» / М. М. Алóхін. – Київ : Інститут проблем виховання НАПН України, 2021. – [313 с.] – Режим доступу: https://ipv.org.ua/wp-content/uploads/2021/10/Dis_Alokhin_.pdf.
291. Андрухов В. М., Потеха А. С., Басистий В. О. Комплексна оцінка доцільності використання ВІМ-технологій для будівельного проєкту // *Сучасні технології в будівництві = Modern Technologies in Construction*. — Vinnytsia : Вінницький національний технічний університет, 2024. — Вип. 36, № 1. — С. 161–165. — DOI: 10.31649/2311-1429-2024-1-161-165.
292. Антонюк, А. О. Програмний застосунок ідентифікації морських об'єктів на основі онтології і прецедентів : дипломна робота бакалавра / Антонюк А. О. – Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2023. – 51 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/87c5a436-fe4b-44b8-b45c-753d7560a228/content>.
293. Баніт І. С. Аналіз та оцінка впливу агротехнічних комплексів на агробіологічні показники в умовах Степу : дис. на здобуття наук. ступ. канд. с.-г. наук / І. С. Баніт. – Київ : Інститут агроєкології та природокористування НААН України, 2018. – [594 с.]. – Режим доступу: https://ipood.com.ua/data/avtoreferaty_i_dysertatsii/2018/DISER_BANIT_2018_pas.pdf.
294. Бараннік В. П., Мельник А. О. *Теорія графів і мереж : навч. посіб.* – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 312 с.
295. Бідюк П. І., Гавриленко С. Ю. *Моделювання та аналіз складних мереж : навч. посіб.* – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 284 с.

296. Бідюк П. І., Романенко В. Д., Тимченко О. В. Аналіз складних систем : методи, моделі, інформаційні технології : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 356 с.
297. Бідюк П. І., Тимченко О. В., Романенко В. Д. Методи спектрального аналізу та оцінювання структурної значущості елементів у складних мережах // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2017. – № 4. – С. 27–39.
298. Бідюк, П. І., & Коршевніюк, Л. О. Проектування комп'ютерних інформаційних систем підтримки прийняття рішень : навч. посіб. / П. І. Бідюк, Л. О. Коршевніюк. – Київ : ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2010. – 340 с. – Режим доступу: <https://duikt.edu.ua/ua/lib/1/category/2138/view/872>.
299. Бідюк, П. І., Тимошук, О. Л., Коваленко, А. Є., & Коршевніюк, Л. О. Системи і методи підтримки прийняття рішень : підручник / П. І. Бідюк, О. Л. Тимошук, А. Є. Коваленко, Л. О. Коршевніюк. – Київ : НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 610 с. – Режим доступу: <https://surl.li/uoaumy>
300. Білик, А. С. Екологічний та економічний аналіз життєвого циклу каркасів будівель: монографія / А. С. Білик. – Київ : УЦСБ – КНУБА, ТОВ «7БЦ», 2022. – 263 с. – Режим доступу: <https://uscc.ua/uploads/page/images/publications/economic/lifecycle.pdf>.
301. Бурдейна Л. І. Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики : зб. наук. праць / Л. І. Бурдейна (ред.). – Вінниця : Вінницький НАУ, 2022 – [264 с.]. – Режим доступу: <https://repository.vsau.org/getfile.php/15356.pdf>.
302. Бурдько В. В., Гурський О. О., Жук І. М. Інформаційні технології в проектуванні та будівництві : монографія. – Мінськ : БНТУ, 2013. – 256 с.
303. Бурлак, А. О. Сутність та класифікація мережевих підприємницьких структур [Електронний ресурс]. — Економіка та управління підприємствами, 2023, с. 129–134. Режим доступу: https://bses.in.ua/journals/2023/79_2023/21.pdf
304. Бушуєв С. Д., Бушуєва Н. С. Когнітивні моделі та методи управління проектами розвитку складних систем // Управління розвитком складних систем. – 2016. – № 25. – С. 6–15.
305. Верескун, М. В. Навчання машин та штучний інтелект: конспект лекцій з дисципліни «Технології програмування» ч. 2 «Навчання машин та штучний інтелект» для студентів напряму підготовки 163 «Біомедична інженерія» всіх форм навчання / уклад. М. В. Верескун. – Маріуполь : ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – 84 с. – Режим доступу: https://events.pstu.edu/bioart/wp-content/uploads/sites/3/2020/04/machine-learning-and-artificial-intelligence-lec_notes.pdf.
306. Верлань, А. Ф., & Ляшенко, О. І. Інформаційні системи з адаптивним управлінням процесами сприймання знань : монографія. – Київ : Педагогічна думка, 2021. – 230 с. – Режим доступу: <https://surl.li/mauxul>
307. Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського (ред.). Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми : зб. наук. праць. – Вип. 48. – Київ-Вінниця : ФОП Тарнашинський О. В., 2017. – 214 с. – Режим доступу: https://www.vspu.edu.ua/faculty/imad/files/z/z_48.pdf.

308. Вісник Львівського університету. Серія: психологічні науки / Львівський нац. ун-т імені Івана Франка. – 2022. – № 12. – Режим доступу: http://psy-visnyk.lnu.lviv.ua/archive/12_2022/12_2022.pdf.
309. Возний, В. С., Максименко, М. Впровадження прогресивної організаційно-технологічної “ВІМ-технології” при проектуванні житлової забудови в м. Одеса [Електронний ресурс]. — ВНТУ, 2021.
310. Вольвач, А. А. «Інформаційне моделювання як засіб управління життєвим циклом будівель і споруд» [Електронний ресурс]. — Праці Одеського політехнічного університету, 2020, № 2(61). DOI: 10.15276/opu.2.61.2020.12.
311. Волянський, П. Б., Гур’єв, С. О., Соловійов, О. С., Терент’єва, А. В. Кризовий менеджмент і принципи управління ризиками в процесі ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій : моногр. / П. Б. Волянський, С. О. Гур’єв, О. С. Соловійов, А. В. Терент’єва. — Київ : Парламентське видавництво, 2021. — 218 с. — Режим доступу: <https://indcz.dsns.gov.ua/upload/1/4/4/4/2/9/3/3PlG3pxUgOobzq5wmms8D1VeKOZJ8IA7EmtVb6ot.pdf>.
312. Гойко А. Ф., Сорокіна Л. В., Скакун В. А. Управління бізнес-процесами як важливий чинник підвищення якості продукції будівництва // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. — Київ : КНУБА, 2018. — Вип. 38. — С. 21–29.
313. Голуб, Р. Р. Аналіз методів Лувена та К-середніх при вирішенні задач кластеризації для визначення спільнот на множині елементів : магістр. кваліфікац. робота / Р. Р. Голуб. — Миколаїв : Чорноморський національний університет імені Петра Могили, 2022. — 83 с. — Режим доступу: <https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2323/1/607%20Голуб%20Ростислав%20Русланович.pdf>.
314. Гриценко, В. Г. Теоретичні та методичні засади проектування і впровадження інформаційно-аналітичної системи управління університетом : дис. ... д-ра пед. наук : 13.00.10 «Інформаційно-комунікаційні технології в освіті (01 «Освіта/Педагогіка»)» / В. Г. Гриценко. — Київ : Ін-т інформаційних технологій і засобів навчання НАПН України, 2019. — 664 с. — Режим доступу: https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/716524/2/dyser_Hrytsenko.pdf
315. Давидова, О. Ю. Інноваційне управління розвитком підприємств готельно-ресторанного господарства : методологія, теорія і практика : монографія / О. Ю. Давидова. — Харків : Вид-во Іванченка І. С., 2018. — 448 с. — Режим доступу: <https://surl.li/lplpsz>
316. Державний біотехнологічний університет. Глобалізація та розвиток інноваційних систем: тенденції, виклики, перспективи : матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф., 14–15 березня 2024 р., Харків. — Харків : Держ. біотехнол. ун-т, 2024. — 565 с. — Режим доступу: <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2024/04/conf-14-15-03-24-mater.pdf>.
317. Деркач А. Є. Економіко-цифровий інструментарій впровадження реінжинірингу на будівельному підприємстві : дис. на здобуття наук. ступ. доктора філософії / Деркач Андрій Євгенійович. — Київ : Київський національний університет будівництва і архітектури, 2023. — [237 с.]. — Режим доступу: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/12/dysertacziya_derkach-andrij.pdf

318. Джиганія М. Вплив BIM технологій на ефективність управління проєктами в будівництві / М. Джиганія, М. Клис // Build-Master-Class-2024 : International scientific-practical conference of young scientists, Kyiv, 05-07 november 2024 / Kyiv national university of construction and architecture (KNUCA); chief editor: V. I. Skochko. – Kyiv : KNUCA, 2024. – С. 385 – 386. – Бібліогр. : 5 назв. URI <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/15832>
319. Джиганія, М., Клис, М. Вплив BIM-технологій на ефективність управління проєктами в будівництві / М. Джиганія, М. Клис // Build-Master-Class-2024: International scientific-practical conference of young scientists, Київ, 05–07 листопада 2024. — К.: КНУБА, 2024. С. 385–386.
320. Димо, В. В. Інтелектуальна система розпізнавання семантики електронного листа : кваліфікаційна робота (бакалавр), спец. 122 «Комп'ютерні науки» / В. В. Димо ; Чорноморський національний університет імені Петра Погили. – Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили, 2022. – 99 с. – Режим доступу: <https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2373/1/402%20Димо%20Валерій%20Володимирович.pdf>.
321. Дмитрієв, О. М. Інформаційна технологія та методи підтримки прийняття рішень при ситуаційному аналізі повітряної обстановки : дис. ... д-ра техн. н. : спеціальність 05.13.06 – Інформаційні технології / О. М. Дмитрієв. – Кропивницький : Льотна академія Національного авіаційного університету, 2020. – 448 с. – Режим доступу: <https://surl.li/oojtjb>
322. Економіка і бізнес: нові реалії, технологічні тренди, цифрові інновації : збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції (Львів-Ірпінь, 15 травня 2025 р.) [Електронне вид.]. – Львів : СПДФО Омельченко В. Г., 2025. – 661 с. – Режим доступу: <https://financial.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/06/Zbirnyk-konferentsii-15-travnia-2025.pdf>.
323. Економіка і регіон : № 1 (88) / 2023 : збірник наукових статей. – Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. – 182 с. – Режим доступу: https://eir.nuppu.edu.ua/files/2023/1_88_2023.pdf.
324. Зайцева Анна Сергіївна. Управління прозорістю розвитку підприємств в умовах конвергенції інвестиційних процесів : дис. ... докт. екон. наук : 08.00.04 – економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності) / Анна С. Зайцева. – Харків : Українська інженерно-педагогічна академія, 2024. – 604 с. – Режим доступу: <https://science.uaepa.karazin.ua/wp-content/uploads/2024/06/dissertation-Zaitseva-1.pdf>.
325. Збірник рефератів фахових видань МОН України. № 11 (2017) : електронне вид. – Київ, 2017. – [215 с.]. – Режим доступу: <https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Електронні%20видання%202017/Збірник%20рефератів%20фахових%20видань%20МОН%20України/Збірник%20МОН%20№11%202017.pdf>.
326. Згуровський М. З., Панкратова Н. Д. Системний аналіз соціально-економічних процесів : монографія. – Київ : Наукова думка, 2015. – 664 с.
327. Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України. Моделі, методи та інформаційні технології прогнозування нелінійних нестационарних процесів в умовах невизначеності : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.06 –

інформаційні технології / О. М. Терентьев. – Київ, 2021. – [469 с.] – Режим доступу: <https://surl.li/rysffy>

328. Інформаційні управляючі системи та технології / за заг. ред. д.е.н., проф. Устенко С. В.. — Київ : Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана, 2019. — 419 с. — Режим доступу: <https://ir.kneu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/f1b2ebe5-7a79-416f-bb46-21c1feed87c1/content>.

329. Казміренко, В. П., Духнович, В. М., Осадько, О. Ю. Засади когнітивної психології спілкування : монографія / В. П. Казміренко, В. М. Духнович, О. Ю. Осадько. — Кіровоград : Імекс-ЛТД, 2013. — 390 с. — Режим доступу: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/9030/1/Kazmirenko-mono.pdf>.

330. Камишин В. В., Рева О. М. Методи і моделі управління розвитком академічної обдарованості : монографія / В. В. Камишин, О. М. Рева. — Київ : Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2018. — 266 с. — Режим доступу: https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/713801/1/Камишин-Рева_монографія%202018_на%20друк.pdf.

331. Квашина, Ю. А. Управління формуванням інноваційного потенціалу підприємства : кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису / Ю. А. Квашина. — Харків : Харківський національний економічний університет, 2025. — [263 с.] — Режим доступу: https://hneu.edu.ua/content/documents/503/50229/Attaches/kvashyna_dis.pdf.

332. Коваль М. С. Формування професійних компетентностей майбутніх учителів у процесі дистанційної підготовки : дис. на здобуття наук. ступ. докт. пед. наук / М. С. Коваль. — Вінниця : Вінницький державний педагогічний університет ім. Михайла Коцюбинського, 2020. — [567 с.]. — Режим доступу: https://vspu.edu.ua/content/specialized_academic_council/doc/2020/Koval_M_S/dis.pdf.

333. Колектив авторів. Інформатика, інформаційні системи та технології : тези доповідей двадцять другої всеукраїнської конференції студентів і молодих науковців, Одеса, 25 квітня 2025 р. — Одеса : Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, 2025. — 315 с. — Режим доступу: <https://surl.li/aceere>

334. Колектив авторів. Сучасні тренди і стратегічні імперативи розвитку HR-інжинірингу, економіки та бізнесу в умовах турбулентності й трансформації національної економіки : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф., м. Хмельницький, 14-15 листопада 2024 р. — Хмельницький : Хмельницький національний університет, 2024. — 302 с. — Режим доступу: https://bine.khmnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/54/zbirnyk-konferencziyi_hr_2024-isbn.pdf

335. Комерціалізація інновацій в умовах Індустрії 4.0 : монографія / за заг. ред. канд. екон. наук, доц. Л. Ю. Сагер. — Суми : Сумський державний університет, 2023. — [385 с.]. — Режим доступу: <http://dspace.puet.edu.ua/bitstream/123456789/13303/1/Монографія%20-%20Комерціалізація%20інновацій%20в%20умовах%20індустрії%204.0.pdf>.

336. Краєвський, В. М., Остапенко, Я. О., Паянок, Т. М., & Параниця, Н. В. Методи аналізу даних у психологічних дослідженнях : навч. посібник / В. М. Краєвський, Я. О. Остапенко, Т. М. Паянок, Н. В. Параниця. — Ірпінь : Державний податковий університет, 2024. — 144 с. — Режим доступу:

<https://dpu.edu.ua/images/Documents/NAUKA/Naukova%20biblioteka/Navcalno-metodicna%20literatura/M/Metodi%20analizu%20danih%20u%20psihologicnih%20doslidzenna h.pdf>.

337. Кременнев, Г. П., Колеснік, В. М., Новіков, Ф. В., & Жовтобрюх, В. О. Тенденції розвитку машинобудування : навч. посіб. / Г. П. Кременнев, В. М. Колеснік, Ф. В. Новіков, В. О. Жовтобрюх. – Одеса : Екологія, 2025. – 142 с. – Режим доступу: <https://repository.hneu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/35838/1/Навч.%20посібник%202025%20Кремнев%20-%20Тенденції%20розвитку%20машинобудування.pdf>.

338. Кремень, В. Г. (ред.) (2014). Синергетика і творчість : монографія. Київ : Інститут обдарованої дитини НАПН України. – 314 с. – Режим доступу: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/9846/1/Kremen%20Synergetyka%20i%20tvorchyst.pdf>.

339. Криворізький державний педагогічний університет. Моделювання особистісних конструктів підлітків у вимірах освітнього простору : монографія [Електронне вид.]. – Луганськ : КДПУ, 2007. – 375 с. – Режим доступу: <https://elibrary.kdpu.edu.ua/bitstream/0564/1754/1/монографія.pdf>.

340. Ланде, Д. В., Субач, І. Ю., Бояринова, Ю. Є. Основи теорії і практики інтелектуального аналізу даних у сфері кібербезпеки : навч. посіб. / Д. В. Ланде, І. Ю. Субач, Ю. Є. Бояринова. – Київ : ІСЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 300 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/5eb4cb50-3ef0-44d1-b35f-a80eade1554b/content>.

341. Львівський національний університет імені Івана Франка. Звітність – 24-25.04.2014 : [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://financial.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2015/10/24-25.04.2014.pdf>.

342. Максименко, С. Д. Психологічна організація модульного формування когнітивних здібностей: генетико-креативний підхід : навч. посіб. / С. Д. Максименко. – Київ : ІПП «ІМЕКС», 2023. – [165 с.] – Режим доступу: <https://surl.li/ecjjjb>

343. Манзюк, Е. А. Теоретичні та прикладні засади інтелектуальної інформаційної технології отримання довірчих рішень за людино-центрованим підходом : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.13.06 «Інформаційні технології» / Е. А. Манзюк. – Хмельницький : Хмельницький національний університет, 2022. – [453 с.] – Режим доступу: https://nauka.khmnu.edu.ua/wp-content/uploads/dysertatsiia_manziuk.pdf.

344. Матеріали конференції/ «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку, автоматизації та кібербезпеки в операції Об'єднаних сил» – Київ : Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, 2025 – 297 с. – Режим доступу: <https://eportfolio.kubg.edu.ua/data/conference/7240/document.pdf>.

345. Мелешко, Є. В. Методологія забезпечення стійкості рекомендаційних систем до дестабілізуючих факторів у комп'ютерних мережах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.05 / Є. В. Мелешко. – Черкаси : Черкаський держ. технологічний ун-т, 2020. – 323 с. – Режим доступу: <https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/1781/5/дисертація%20Мелешко%20Є.В..pdf>.

346. Міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні системи та інформаційні технології» (ISIT-2019). – Одеса : ТЕС, 2019. – 270 с. –

https://pzs.dstu.dp.ua/ComputerGraphics/scaling/bibl/ISIT-2019_PROCEEDINGS.pdf.

347. Міністерство освіти і науки України, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Інформатика, управління та штучний інтелект: тези дванадцятої міжнародної науково-технічної конференції (14–16 травня 2025 року). – Харків – Краматорськ – Тернопіль : НТУ «ХПІ», 2025. – 132 с. – Режим доступу: https://web.kpi.kharkov.ua/ai/wp-content/uploads/sites/249/2025/05/TEZY_IUSHI_06.05.2025.pdf.

348. Міністерство освіти і науки України. Збірник рефератів фахових видань МОН України : № 7 (2018) [Електронне вид.] – Київ : Державна наукова установа «Український інститут науково-технічної експертизи та інформації», 2018. – Режим доступу: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Електронні%20видання%202018/Збірник%20рефератів%20фахових%20видань%20МОН%20України/Збірник%20рефератів%20МОН%20№7_2018.pdf.

349. Мінухін, С. В., & Знахур, С. В. Методи інтелектуального пошуку інформації в GRID-мережі / С. В. Мінухін, С. В. Знахур. – Х. : ХНЕУ, 2009. – 6 с. – Режим доступу: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/a5dda219-f92d-42e9-a003-2d86e942dbbd/content>.

350. Мокін, В. Б., & Дратований, М. В. Наука про дані: машинне навчання та інтелектуальний аналіз даних : електрон. навч. посібник / В. Б. Мокін, М. В. Дратований. – Вінниця : ВНТУ, 2024. – 263 с. – Режим доступу: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Mokin_2024_263.pdf.

351. Найдьонова, Л. А. Рефлексивна психологія територіальних спільнот : монографія / Л. А. Найдьонова. – Київ : Міленіум, 2012. – 280 с. – Режим доступу: <https://surl.li/nmdv1r>

352. Непорожня, Л. В. Формування природничо-наукової компетентності старшокласників у процесі навчання фізики : метод. посіб. – Київ : ТОВ «КОНВІ ПРІНТ», 2018. – ISBN 978-617-7724-09-3. – Режим доступу: https://undip.org.ua/wp-content/uploads/2021/07/form_pr_2018.pdf.

353. Нестеренко, О. В., Савенков, О. І., & Фаловський, О. О. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень : навч. посіб. / О. В. Нестеренко, О. І. Савенков, О. О. Фаловський. – Київ : Нац. акад. управління, 2016. – 186 с. – ISBN 978-966-8406-94-2. – Режим доступу: <https://nam.kyiv.ua/files/publications/978-966-8406-94-2-pos.pdf>.

354. Підлипний Ю.В. «Можливості інформаційного моделювання будівель для діджиталізованого управління ризиками в будівництві» [Електронний ресурс]. — Наукові вісті НУ “Львівська політехніка”, 2023. Режим доступу: <https://nv.nltu.edu.ua/index.php/journal/article/view/2479>

355. Примаков В. Управління знаннями — Київ: Київський нац. ун-т ім. Тараса Шевченка, 2018. — 256 с.

356. Просяник, М. Л. BUILDING INFORMATION MODELING (BIM): сутність, стан поширення та перспективи для України [Електронний ресурс]. — 2022. Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/40590/15052.pdf>

357. Распутный Д.С. Оцінка економічної ефективності використання інформаційного моделювання будівель [Електронний ресурс]. — Наукові записки

Львівського університету будівництва та архітектури, 2025. — С. ... (PDF файл). Режим доступу: <https://nzlubp.org.ua/index.php/journal/article/view/1749>

358. Русак Денис Миколайович. Розвиток глобальних корпоративних мереж в умовах геоекономічних трансформацій : дис. ... д-ра економ. наук : 08.00.02- світове господарство і міжнародні економічні відносини / Д. М. Русак. — Київ : Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2019. — Режим доступу: <https://surl.li/bapswm>

359. Русак, Д. М. Розвиток глобальних корпоративних мереж в умовах геоекономічних трансформацій : дис. ... д-ра економічних наук : спец. 08.00.02 «Світове господарство і міжнародні економічні відносини» / Д. М. Русак. — Київ : Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2019. — 510 с. — Режим доступу: https://scc.knu.ua/upload/iblock/4e4/dis_Rusak%20D.M._new.pdf.

360. Савицька, Н. Л., Синицина, Г. А., Олініченко, К. С. Рекламний менеджмент : навч. посібник [Електронний ресурс] / Н. Л. Савицька, Г. А. Синицина, К. С. Олініченко. — Харків : Іванченко, 2015. — 169 с. — Режим доступу: <https://kjourn.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/54/2018/04/Рекламний-менеджмент-1.pdf>.

361. Садівник, М. П. Інформаційна система для прогнозування вартості житла на основі послідовної моделі машинного навчання з веб-інтерфейсом : дипломна робота магістра / М. П. Садівник. — Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. — 115 с. — Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/30746/2/dyplom_Sadivnyk.pdf.

362. Салабай, В. О. Магістерська дисертація на здобуття ступеня магістра за освітньо-професійною програмою «Менеджмент і бізнес-адміністрування». — Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2020. — 111 с. — Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/dccb7e41-b1f8-48a5-be84-4dca57e7eac7/content>.

363. Семікіна, М. В., Дудко, С. В., Орлова, А. А., Нісфоян, С. С., Сторожук, О. В., Коваль, Л. А. Професійний розвиток персоналу підприємств в системі мотиваційного менеджменту : колективна монографія / М. В. Семікіна, С. В. Дудко, А. А. Орлова та ін. — Кропивницький : ТОВ «КОД», 2021. — 440 с. — Режим доступу: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0058219.pdf>.

364. Сисоєв О. В.. Тенденції професійної підготовки фахівців із циркулярної економіки у Фінляндійській Республіці, Республіці Польща і Україні : дис. на здобуття наук. ступ. докт. пед. наук за спец. 13.00.04 «Теорія і методика професійної освіти». — ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка», Київ · Полтава, 2023. — 557 с.

365. Сорочак, О. З., Гвоздь, М. Я. Цифрова революція в менеджменті знань: адаптація до викликів та перспективи [Електронний ресурс]. — 2025.

366. Таран, О. Р. «Управління життєвим циклом об'єкту капітального будівництва на основі сучасної технології інформаційного моделювання (BIM)» [Електронний ресурс]. — Будівельні ресурси, 2023, № 43. DOI: 10.31713/budres.v0i43.35. URL: <https://budres.org/index.php/budres/article/view/460>

367. Технології менеджмента знань в документаційній роботі підприємств / Луговая Т. А., Кліменко Я., Костецька А. (2016). Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні питання документознавства та інформаційної

діяльності». — [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/8469/3/Лугова%20Клименко%20Костецька.pdf>

368. Третьякова А.І. «Цифрове будівництво: BIM-моделі в управлінні інвестиційними проектами» [Електронний ресурс]. — 2024. Режим доступу: https://cms.economics-management.e-u.edu.ua/uploads/10_8601137eab.pdf

369. Тугай О. А., Лисенко О. М. Управління якістю в будівництві : монографія. — Київ : КНУБА, 2014. — 268 с.

370. Ужгородський національний університет. Колектив авторів. Кафедральний каталог вибіркових навчальних дисциплін першого (бакалаврського) рівня вищої освіти на 2025-2026 навчальний рік : навч. посіб. — Ужгород : УНУ, 2025. — 97 с. — Режим доступу: <https://www.uzhnu.edu.ua/uk/infocentre/get/73907>.

371. Управління знаннями на підприємстві: моделі, етапи та технології / Шимановська-Діанич Л. М., Лозова О. В. // Економіка: реалії часу, 2023, № 4 (68). [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://economics.net.ua/files/archive/2023/No4/76.pdf> ECONOMIC SCIENTIFIC PORTAL

372. Управління знаннями як інструмент забезпечення інноваційного розвитку підприємства / Смолінська Н. В., Грибик І. І. (2015). — [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/2732/visnyk2015-248-255.pdf>

373. Чорноус, Г. О. Моделювання процесу прийняття управлінських рішень в соціально-економічних системах на основі інтелектуального аналізу даних : дис. ... д-ра екон. наук / Г. О. Чорноус. — Київ, 2015. — 485 с. — Режим доступу: https://scc.knu.ua/upload/iblock/af3/dis_Chornous%20G,O..pdf.

374. Чуприна Ю. А. Економічна ефективність управління інвестиційно-будівельними проектами : монографія. — Київ : КНУБА, 2016. — 312 с.

375. Чуприна Ю. А., Беленкова О. Ю., Шпакова Г. В. управління складними інвестиційно-будівельними проектами в умовах невизначеності : монографія. — Київ : КНУБА, 2018. — 344 с.

376. Шамралюк Олена Леонідівна. Розвиток технологічної культури майстрів виробничого навчання аграрного профілю в навчально (науково)-методичних центрах професійно-технічної освіти : дис. ... канд. пед. наук : 13.00.04 / О. Л. Шамралюк. — Київ : Інститут професійно-технічної освіти НАПН України, 2021. — 353 с. — Режим доступу: <https://surl.li/vdkmlw>

377. Шимановська-Діанич, Л. М., Лозова, О. В. «Управління знаннями на підприємстві: моделі, етапи та технології». Економіка: реалії часу, 2023, № 4 (68), с. 76–82.

378. Шматько, Н. М., Кармінська-Белоброва, М. В., Замула, О. В. та ін. Менеджмент: організаційна ефективність : навч. посіб. / Н. М. Шматько, М. В. Кармінська-Белоброва, О. В. Замула та ін. — Харків : НТУ «ХПІ», 2024. — 280 с. — Режим доступу: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi81/0061446.pdf>.

379. Янковой, Р. В. Інноваційне стратегування діяльності вітчизняного бізнесу : дис. ... д-ра екон. наук : 08.00.04 — економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності) / Р. В. Янковой. — Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2024. — [431 с.] — Режим доступу: <https://surl.li/ycsqxr>

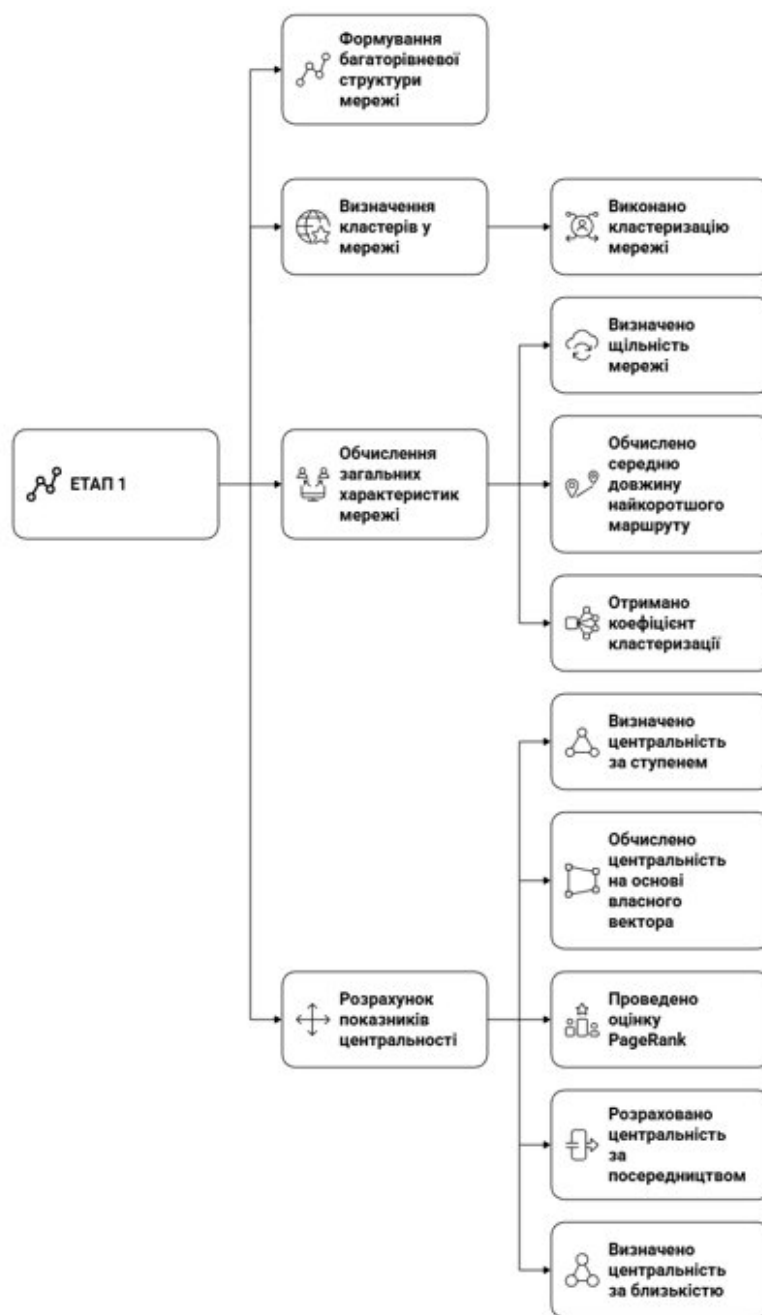


Рис.6.11. Схема реалізації першого етапу аналізу мережі комунікаційних взаємозв'язків проєкту (розроблено автором на основі [2])

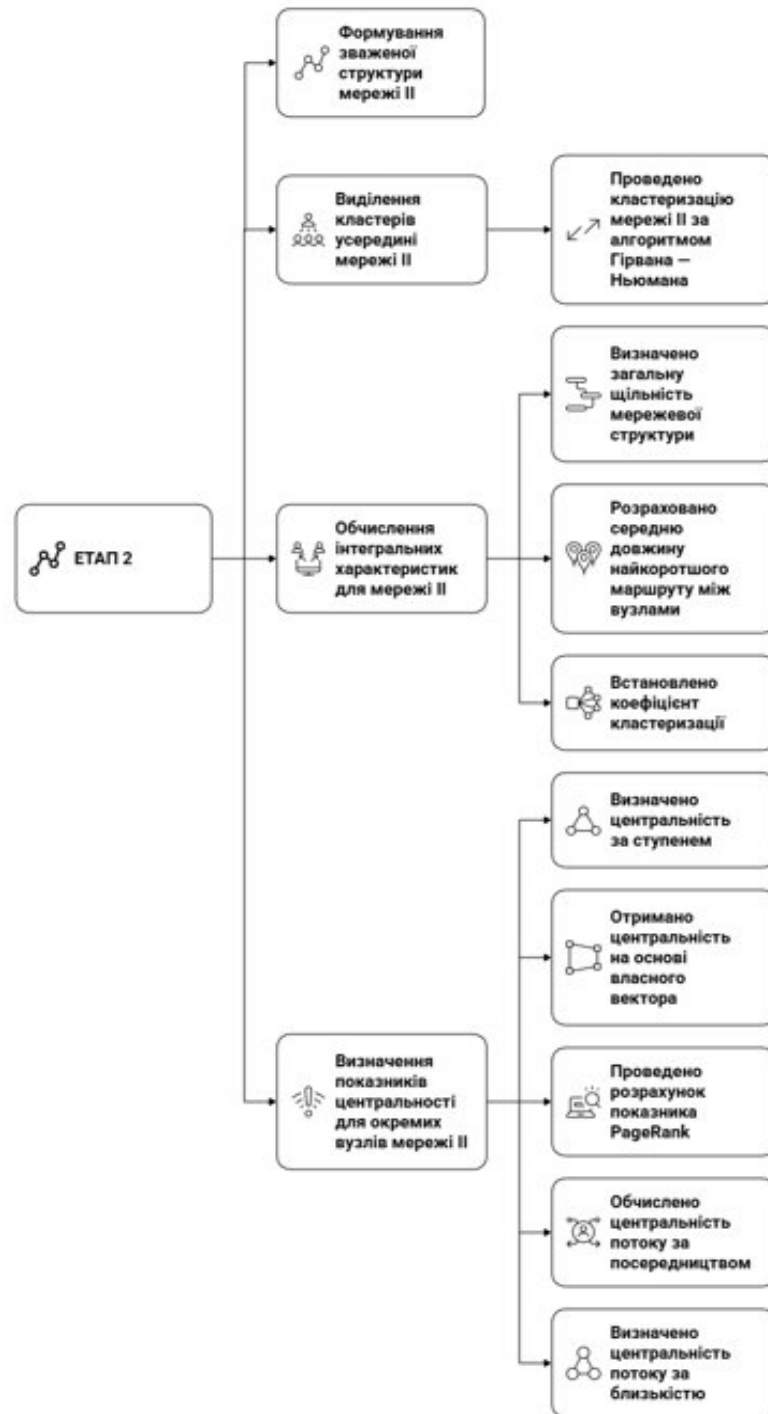


Рис. 6.12. Схема реалізації другого етапу аналізу мережі комунікаційних взаємозв'язків проєкту (розроблено автором на основі [165])



Рис.3. Схема реалізації третього етапу аналізу мережі комунікаційних взаємозв'язків проєкту (розроблено автором на основі [165])

Таблиця 6.5.

Оцінка параметрів центральності елементів мережі І
(розроблено автором на основі [144])

Посада / Роль	Центральність за ступенем	Page Rank	Векторна центральність	Посередництво	Близькість
Контроль якості будівництва	1,003	0,272	0,059	0,121	1,004
Керівник будівельного проєкту	0,882	0,232	0,053	0,101	0,895
Завідувач будівельної ділянки	0,851	0,257	0,049	0,041	0,871
Виконроб інженерних систем	0,851	0,257	0,049	0,041	0,871
Інженер виробничо-технічного відділу	0,821	0,253	0,047	0,03	0,849
Провідний інженер	0,821	0,253	0,047	0,03	0,849
Архітектор з авторського супроводу	0,701	0,223	0,041	0,017	0,769
Інженер-конструктор	0,669	0,214	0,038	0,017	0,752
Головний механік об'єкта	0,638	0,193	0,037	0,022	0,736
Геодезичний відділ	0,639	0,202	0,037	0,017	0,735
Інженер з охорони праці	0,639	0,202	0,037	0,017	0,735
Менеджер матеріально-технічного забезпечення	0,517	0,18	0,032	0,01	0,675
Відділ кошторисної документації	0,517	0,184	0,031	0,008	0,675
Головний проєктувальник	0,517	0,185	0,031	0,007	0,675
Проєктант електричних мереж	0,487	0,166	0,03	0,014	0,662
Проєктант ВіК	0,487	0,176	0,03	0,006	0,662
Проєктант газових	0,487	0,179	0,03	0,004	0,662

мереж					
Проектант слабострумових систем	0,426	0,155	0,027	0,007	0,637
Конструктор робіт, ліцензованих ДСНС	0,396	0,147	0,026	0,005	0,625
Проектант земляних процесів	0,396	0,152	0,025	0,003	0,625
Інженер монолітних робіт	0,366	0,092	0,026	0,013	0,613
Інженер цегляної кладки	0,366	0,102	0,026	0,011	0,613
Спеціаліст покрівельних робіт	0,366	0,102	0,026	0,011	0,613
Майстер віконно- дверних систем	0,366	0,136	0,024	0,009	0,613
Інженер внутрішніх мереж ВіК	0,366	0,138	0,024	0,006	0,613
Інженер теплотехнічних систем	0,366	0,142	0,024	0,003	0,613
Інженер газопостачальних мереж	0,366	0,141	0,024	0,003	0,613
Спеціаліст слабострумових робіт	0,366	0,141	0,024	0,003	0,613
Майстер робіт з улаштування підлог	0,335	0,134	0,022	0,003	0,602
Ліцензовані роботи ДСНС	0,305	0,081	0,022	0,008	0,592
Фасадні роботи утеплення й оздоблення	0,214	0,054	0,018	0,003	0,561
Роботи з благоустрою території	0,214	0,05	0,018	0,001	0,561
Штукатурні та облицювальні роботи	0,154	0,045	0,014	0,003	0,543
Внутрішні оздоблювальні роботи	0,154	0,064	0,014	0,001	0,543

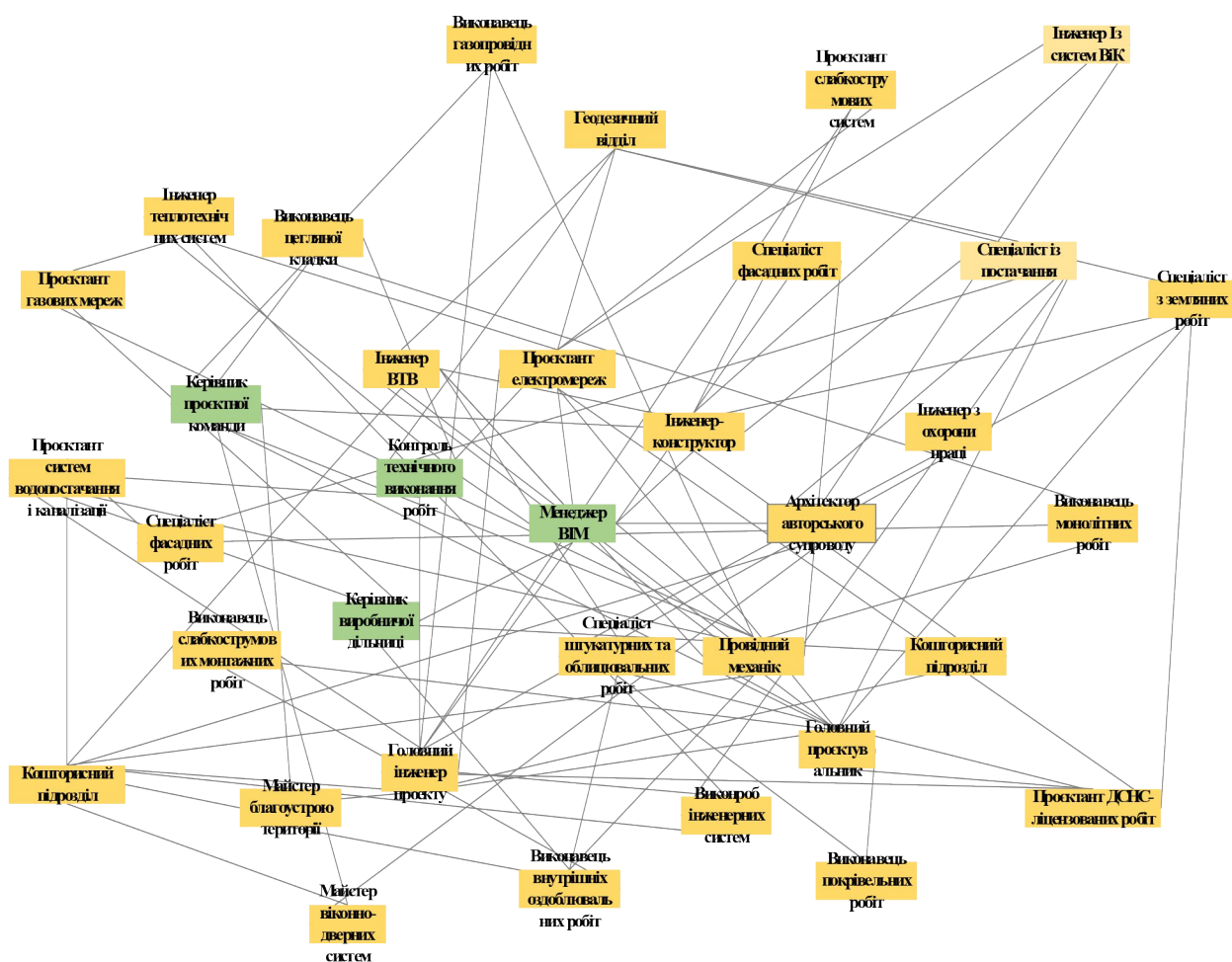


Рис.12. Центральність вузлів мережі ІІІ за власним вектором (розроблено автором на основі [342])

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-КОГНІТИВНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПАРАДИГМИ УПРАВЛІННЯ БУДІВЕЛЬНИМИ ПРОЄКТАМИ	10
1.1. Еволюція управлінських підходів у проєктному менеджменті: від класичних моделей до когнітивно-орієнтованих систем.....	10
1.2. Концепція управління знаннями як детермінанта ефективності реалізації будівельних проєктів.....	19
1.3. Сутність і структура когнітивних механізмів у процесах прийняття управлінських рішень.....	32
1.4. BIM-технології як інформаційна основа когнітивного простору будівельного проєкту.....	45
1.5. Постановка проблеми та визначення наукових завдань дослідження.....	59
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА ІНСТРУМЕНТАРІЙ АНАЛІЗУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНО-КОГНІТИВНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ	75
2.1. Концептуальні основи побудови систем управління будівельними проєктами в контексті цифрової трансформації.....	75
2.2. Методичні підходи до ідентифікації та формалізації знань у BIM-середовищі.....	87
2.3. Методи оцінювання ефективності впровадження BIM у проєктному управлінні.....	99
2.4. Моделі дослідження мережових структур і потоків знань у когнітивному середовищі проєкту.....	113
РОЗДІЛ 3. АНАЛІТИКО-СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ СИНЕРГЕТИЧНИХ ЕФЕКТІВ ІНТЕГРАЦІЇ BIM-ТЕХНОЛОГІЙ У УПРАВЛІННІ ЗНАННЯМИ	127
3.1. Ідентифікація джерел і структур синергетичного ефекту в інтегрованих будівельних проєктах.....	127
3.2. Порівняльний аналіз міжнародного досвіду застосування когнітивно-орієнтованих BIM-платформ.....	136
3.3. Когнітивні переваги інформаційного моделювання як інструменту управління знаннями.....	151
3.4. Оцінювання ефектів інтеграції методів IPD (Integrated Project Delivery) та BIM у єдину когнітивну модель.....	163
РОЗДІЛ 4. КОГНІТИВНО-ІНТЕГРАЦІЙНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ БУДІВЕЛЬНИМИ ПРОЄКТАМИ	173
4.1. Система когнітивної взаємодії учасників будівельного проєкту.....	173
4.2. Діагностика причин інформаційних дисонансів і переробок у BIM-середовищі.....	182
4.3. Аналіз впливу змін проєктних параметрів на когнітивну стабільність системи.....	193
4.4. Моделювання впливу транзакційних витрат і ефектів взаємодії на синергетичну динаміку проєкту.....	203

РОЗДІЛ 5. ІНФОРМАЦІЙНО-КОГНІТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ.....	216
5.1. Розроблення моделі вибору оптимальної організаційно-мережевої структури когнітивного типу.....	216
5.2. Математична модель оцінки синергетичного ефекту впровадження інтегрованих BIM-систем.....	228
5.3. Алгоритмічні підходи до оптимізації процесів управління на основі когнітивного аналізу.....	242
5.4. Використання методів кластеризації для виділення інтелектуальних спільнот у мережі учасників проєкту.....	256
 РОЗДІЛ 6. НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ КОГНІТИВНИХ BIM-СИСТЕМ У БУДІВНИЦТВІ.....	 271
6.1. Інтеграція технологій BIM і Big Data як основа генерування нових знань у будівництві.....	271
6.2. Механізми адаптації когнітивного управління до умов публічних будівельних замовлень.....	285
6.3. Оптимізація комунікаційних і знанневих потоків у цифровій мережі проєктної взаємодії.....	298
6.4. Емпірична верифікація моделі оцінки ефектів впровадження когнітивної BIM-системи.....	312
 ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	 326
ЛІТЕРАТУРА.....	329
ДОДАТКИ.....	358
ЗМІСТ.....	364

Київський національний університет будівництва і архітектури

Чуприна Ю.А.

«Система когнітивно-інтеграційного моделювання організації
будівництва»

За авторською редакцією
Комп'ютерна верстка – Сердюк В.Л.

Формат 60×84/8 Папір офсетний 80гр/м2.
Друк цифровий Гарнітура Times New Roman
Ум. друк. арк.11.85 Обл.-вид. арк.8,52
Наклад 50 прим.

Підписано до друку 26.02.2026
Друк ПП «Сердюк В.Л.» Свідоцтво про внесення
до державного реєстру видавців, виготівників
та розповсюджувачів видавничої продукції
Серія ДК № 3360 від 30.12.2008 р.