

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

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ОНОФРІЙЧУК ОЛЕГ ПЕТРОВИЧ

УДК 338.24:004:69:502.131.1

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЕКОНОМІКО-ЦИФРОВІ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ
ПІДПРИЄМСТВАМИ-СТЕЙКХОЛДЕРАМИ ПРОЄКТІВ
БІОСФЕРОСУМІСНОГО БУДІВНИЦТВА**

Спеціальність 08.00.04 – Економіка та управління підприємствами
(за видами економічної діяльності)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора економічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



О. П. Онофрійчук

Ідентичність усіх примірників дисертації ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради _____ В.В. Титок

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Онофрійчук О. П. Економіко-цифрові моделі управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва. – *Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора економічних наук за спеціальністю 08.00.04 – економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності). – Київський національний університет будівництва і архітектури, Міністерство освіти і науки України, Київ, 2026.

Дослідження присвячене розв’язанню наукової проблеми формування концептуально-онтологічних і методологічних засад економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва та створенню інструментарію інтегрованого оцінювання, сценарного прогнозування й інтелектуальної підтримки управлінських рішень. Необхідність такого розв’язання зумовлена одночасною трансформацією економічного, технологічного, екологічного та інституційного середовища будівельної діяльності, у якому традиційна орієнтація на вартість, строки та виробничу продуктивність не забезпечує достатньої керованості довготривалих багатосуб’єктних проєктів.

Підприємство-стейкхолдер розглядається як учасник проєктної екосистеми, що залучає ресурси, створює й використовує цифрові дані, приймає та передає ризики, виконує функціональні ролі й бере участь у формуванні економічної, екологічної та суспільної цінності будівельного активу. Його результативність визначається не лише внутрішньою ефективністю, а й сумісністю даних, узгодженістю рішень, якістю міжорганізаційної координації та здатністю забезпечувати цифрову доказовість зобов’язань упродовж життєвого циклу об’єкта.

Біосферосумісне будівництво трактовано як модель створення економічної та суспільної цінності за дотримання природних, ресурсних, соціальних і просторово-інфраструктурних умов відтворення території. Така постановка переводить екологічні параметри з площини додаткових

характеристик будівельного продукту до складу управлінських обмежень, критеріїв вибору та контрольованих показників на стадіях ініціювання, проєктування, закупівель, будівництва, експлуатації, реконструкції та завершення життєвого циклу активу.

Концептуальна позиція дослідження полягає в тому, що цифрова трансформація набуває економіко-управлінського змісту лише за наявності простежуваного зв'язку між даними, рішеннями та результатами. BIM, спільні середовища даних, цифрові двійники, простори даних, аналітика й засоби штучного інтелекту утворюють економіко-цифрову модель тоді, коли цифрові сутності пов'язані з економічними цілями, відповідальними учасниками, правилами, ризиками, критичними порогами та процедурами коригування. Методологічна логіка поєднує стейкхолдерсько-екосистемний, проєктно-орієнтований, життєвоцикловий, ризик-орієнтований та індикативно-критеріальний підходи у замкнений цикл «вимоги і цілі – учасники, процеси та дані – оцінювання – прогнозування – управлінське рішення – перевірка – коригування». Цифрові дані при цьому розглядаються як керований економічний ресурс і доказова основа перевірки управлінських рішень, що дає змогу пов'язати технологічну трансформацію з вимірюваними економічними, екологічними та соціальними результатами.

Перший розділ формує концептуально-онтологічне підґрунтя економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами. Обґрунтовано кумулятивний характер парадигмізації управління: ресурсна дисципліна інтегрується у проєктно-процесну координацію, процесна логіка доповнюється цифровими даними, цифровізація поширюється на стейкхолдерську екосистему, а економічні рішення підпорядковуються життєвоцикловим і біосферосумісним обмеженням.

Виокремлено п'ять етапів розвитку управлінської парадигми: індустріально-ресурсний, проєктно-процесний, цифрово-інтеграційний, стейкхолдерсько-екосистемний і біосферосумісний економіко-цифровий. Для кожного визначено домінантний об'єкт управління, механізми координації,

критерії результативності та методологічні обмеження. Доведено, що біосферосумісна модель не заперечує ресурсної й проєктної раціональності, а включає їх до ширшої системи, де вартість, строки та продуктивність співвідносяться з цифровою доказовістю, екологічними межами, стейкхолдерською легітимністю й довгостроковою цінністю активу.

Розвинено понятійно-категоріальний апарат дослідження. Підприємство-стейкхолдер визначено як відкриту багаторівневу економічну систему, що виконує певну функцію у створенні проєктної цінності, формує і використовує дані, залучає ресурси, приймає ризики та несе відповідальність за результати діяльності. Біосферосумісну стейкхолдерсько орієнтовану економіко-цифрову модель управління визначено як інтегровану систему принципів, даних, процедур, інституційних правил, механізмів взаємодії та показників, за допомогою якої підприємство планує, координує, контролює й коригує створення будівельної цінності впродовж життєвого циклу активу.

Сформовано онтологічну модель економіко-цифрового управління, що усуває фрагментованість інформаційного середовища та забезпечує семантичну узгодженість даних. У її структурі виокремлено сім базових класів керованих сутностей: фізичний актив, цифровий актив, процес, учасник, ресурс, правило та показник. Їх взаємодію організовано через онтологічно-категоріальний, семантико-інформаційний, процесно-інтеграційний, аналітико-прогнозний, економіко-ціннісний контури та контур врядування даними. Архітектоніка пов'язує цифровий об'єкт із джерелом інформації, відповідальним учасником, правилами використання, фазою життєвого циклу та вимірюваним наслідком. Запропоноване структурування дає змогу розглядати ВІМ, цифровий двійник, спільне середовище даних і простір даних як функціонально диференційовані компоненти єдиного контуру, а не як незалежні технологічні рішення.

Стейкхолдерсько-екосистемний складник розвиває традиційні підходи до аналізу заінтересованих сторін шляхом доповнення оцінювання впливу й заінтересованості ресурсним, інтересовим, владним, ризиковим і данієвим

вимірами. Підприємство-стейкхолдер постає носієм ресурсів, інформації, знань, повноважень, ризиків, відповідальності та частини спільно створюваної цінності. Обґрунтовано динамічний перегляд ролей і значущості учасників відповідно до фаз життєвого циклу проєкту.

Результати першого розділу інтегровано у концептуально-онтологічну платформу, яку утворюють еволюційно-онтологічний, стейкхолдерсько-екосистемний, стійкісно-культурний, оцінювальний, інституційно-ризиковий та інструментально-цифровий контури. Їх взаємодія встановлює причинно-логічні переходи між інституційними вимогами, проєктними даними, поведінкою учасників, ризиками, оцінюванням і управлінським коригуванням. Наукова відмінність платформи полягає у тому, що цифрові, економічні, екологічні та стейкхолдерські параметри не розглядаються паралельними блоками: вони поєднані через спільну логіку даних, відповідальності, ризику й перевірюваного результату, що забезпечує методологічну цілісність подальших моделей.

Другий розділ формує методологічний базис оцінювання економіко-цифрового управління та параметри подальшої моделі IDEM. Розвинено методологію стійкості та резильєнтності підприємств-стейкхолдерів. Стійкість визначає здатність утримувати допустимі параметри економічної, організаційної, цифрової та екологічної результативності, а резильєнтність – зберігати критичні функції, поглинати наслідки збурення, відновлювати керованість і реконфігурувати ресурси, компетентності та партнерські зв'язки.

Резильєнтність формалізовано через послідовність «передбачення – реагування – відновлення – трансформація» та поєднання фінансової, операційної, інвестиційно-інноваційної, організаційної, інформаційно-цифрової й екосистемної складових. Інформаційно-цифрову стійкість виділено як самостійну характеристику доступності, достовірності, сумісності, захищеності та відновлюваності критичних даних. Аналітичне дослідження будівельної сфери України обґрунтувало необхідність оцінювати

стійкість через компонентний профіль підприємства, а не один фінансовий показник або масштаб діяльності.

Розкрито інноваційно-екологічну корпоративну культуру як міжорганізаційний механізм відтворення екологічних орієнтирів, вимог до якості даних, інноваційних практик і норм відповідальності в мережі учасників. На основі міжнародного досвіду виокремлено регуляторно-таксономічну, стандартизаційно-верифікаційну, циркулярно-екосистемну, екоінноваційно-цифрову та проєктно-життєциклову моделі її інституціоналізації. Для українського середовища сформовано структурно-адаптаційну модель, що поєднує європейську нормативну прозорість, азійську дисципліну виконання та американську ринкову й інноваційну мотивацію.

Доведено некомпенсаційний характер інноваційно-екологічної культури: висока інноваційна активність не компенсує дефіциту циркулярності ресурсів, сертифікована система менеджменту – інформаційної фрагментованості, а високий рівень перероблення відходів не є тотожним збереженню функціональної цінності матеріалів. Це положення поширено на подальше інтегральне оцінювання, у якому критичний дефіцит окремих компонентів не повинен повністю перекриватися високими значеннями інших.

Сформовано індикативно-критеріальну систему економіко-цифрового управління з п'ятьма результуючими компонентами: економічною результативністю; цифровою зрілістю управління; екологічною та біосферосумісною ефективністю; стейкхолдерно-людиноцентричною орієнтованістю; організаційно-інноваційною стійкістю. Для індикаторів визначено економічний зміст, напрям впливу, джерело й власника даних, суб'єкта розрахунку та верифікації, періодичність оновлення і спосіб нормування. Така побудова усуває ситуацію, за якої формальне досягнення результату оцінюється без перевірки інформаційної основи та способу його отримання, і забезпечує зв'язок кожного індикатора з конкретною управлінською дією.

Індикатори диференційовано на показники результату, процесу та доказовості; встановлено некомпенсаційні критичні обмеження для параметрів безпеки, законності, екологічної допустимості та якості даних. Розроблено стадійно-шлюзову модель G1–G7, яка інтегрує оцінювання у життєвий цикл будівельного проєкту та передбачає перехід між фазами після підтвердження достатності даних, виконання критичних порогів і визначення відповідальних суб'єктів. Отримані положення формують методологічний перехід до моделі економіко-цифрового управління. У результаті індикативно-критеріальна система виконує не лише вимірювальну, а й регуляторну функцію: вона дозволяє визначати допустимість переходу до наступної фази проєкту, локалізувати дефіцит управлінської спроможності та пов'язувати його з відповідальним учасником і джерелом даних.

Третій розділ спрямовано на формування інституційно-ризикового та інструментально-цифрового контурів управління. Досліджено перетворення зовнішніх екологічних, соціальних і управлінських вимог у внутрішні правила діяльності підприємства. Обґрунтовано, що нормативна вимога стає управлінською після її трансформації у параметричну директиву, критичний поріг, визначене джерело даних, закріплену відповідальність, процедуру верифікації та наслідок відповідності або невідповідності.

Інституціоналізацію ESG-принципів обґрунтовано через взаємодію зовнішнього інституційного, внутрішнього корпоративного та цифрового контурів управління даними. Розмежовано функції корпоративної соціальної відповідальності й ESG-управління: перша формує ціннісно-поведінкову готовність приймати зобов'язання, друге забезпечує їх операціоналізацію через показники, пороги, дані, оцінювання суттєвості та управлінські наслідки.

Розроблено рекурсивний дев'ятиетапний механізм інтеграції ESG-вимог: ідентифікація, визначення суттєвості, мапування на фази життєвого циклу, закріплення відповідальності, формування показників і порогів, організація даних, включення у прийняття рішень, верифікація та розкриття

результатів зі зворотним зв'язком. Зміна нормативного критерію, проєктного параметра, технології, учасника або якості даних запускає повторне проходження відповідних етапів і формує інституційну пам'ять моделі.

Розвинено методологію управління ризиками шляхом розмежування передачі ризику та його адаптивної алокації. Передача змінює суб'єкта договірною або фінансовою наслідку, тоді як адаптивна алокація визначає, хто здатний контролювати джерело ризику, формувати дані, приймати рішення, реалізовувати превентивні заходи, фінансувати залишковий ризик і забезпечувати зовнішню комунікацію.

Розроблено механізм адаптивної алокації ризиків, що поєднує інституційно-контрактний, цифрово-аналітичний та екосистемно-поведінковий рівні. Раціональність розподілу оцінюється за контрольованістю джерела ризику, доступом до інформації, спроможністю мінімізувати наслідки, правовою визначеністю, економічною мотивацією, життєвоцикловим впливом, соціальною легітимністю та цифровою перевірюваністю. Розмежовано ролі власника даних, відповідального за реагування, виконавця, носія фінансового резерву та суб'єкта зовнішньої комунікації; для цифрової фіксації запропоновано паспорт ризику.

У межах інструментально-цифрового напрямку сформовано функціональну модель цифрового забезпечення стратегічних цілей біосферосумісного будівництва. Її ядро утворюють спільне середовище даних та інформаційна модель об'єкта, інтегровані з цифровим двійником, моніторингом, аналітикою, прогнозуванням, LCA, LCC, багатокритеріальним вибором і управлінським контролем. Рольовий вектор усуває «порожню відповідальність», коли ризик має формального власника, але не забезпечений даними, виконавцем заходів або фінансовим покриттям. Конфігурація ролей переглядається після появи нових цифрових доказів або зміни спроможності учасника контролювати джерело ризику.

Сформовано цільово-трасувальний ланцюг «стратегічна ціль – показник – джерело даних – цифровий інструмент – управлінське рішення – перевірка

результату» та п'ятирівневу логіку цифрової зрілості підприємств-стейкхолдерів. Цифрова зрілість визначається не кількістю програмних засобів, а здатністю інформаційної архітектури підтримувати конкретні економічні, екологічні, соціальні й проєктні рішення та забезпечувати простежуваність між фазами життєвого циклу, підприємствами й управлінськими рівнями.

Четвертий розділ присвячено формалізації інструментарію інтелектуального економіко-цифрового управління та побудові багаторівневої нечітко-логічної моделі IDEM. Застосування нечіткої логіки обґрунтовано неоднорідністю вихідних параметрів, серед яких поряд із кількісними фінансовими та ресурсними показниками використовуються кваліметричні характеристики цифрової зрілості, стейкхолдерської взаємодії, екологічної відповідальності, адаптивності та організаційної спроможності. Цей підхід переводить цифровізацію зі сфери технологічного оснащення у площину керованої інформаційної архітектури, де кожний цифровий інструмент має бути обґрунтований конкретною управлінською функцією, показником і процедурою перевірки результату.

Архітектура IDEM побудована за дворівневим принципом. На нижньому рівні вихідні параметри агрегуються у п'ять підсистем: Out1 – економічна результативність; Out2 – цифрова зрілість управління; Out3 – екологічна та біосферосумісна ефективність; Out4 – стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість; Out5 – організаційно-інноваційна стійкість. Для кожної підсистеми сформовано вхідні змінні, лінгвістичні терми, функції належності та базу нечітких правил; верхній рівень забезпечує нелінійне агрегування Out1–Out5 у IDEM за алгоритмом Мамдані.

На відміну від адитивних інтегральних показників, IDEM відтворює конфігурацію взаємодії часткових оцінок і враховує ситуації, за яких високий рівень одного параметра не усуває критичного дефіциту іншого. Нечіткі правила забезпечують інтерпретованість виведення та дозволяють співвідносити підсумкову оцінку з активованими комбінаціями вхідних умов.

Для перевірки поведінки IDEM в умовах багатофакторної невизначеності застосовано латинське гіперкубічне формування вибірки. Сформовано масив із 3334 сценаріїв, кожен з яких відображає окрему конфігурацію економічних, цифрових, екологічних, соціальних та організаційних характеристик. Сценарне моделювання доповнено статистичним, перцентильним і кореляційним аналізом, перевіркою структурної незалежності компонентів та оцінюванням чутливості інтегрального результату.

На основі сценарного масиву сформовано нейромережевий модуль прогнозування IDEM. Його призначення полягає у швидкому відтворенні змістовно обґрунтованої нелінійної залежності для нових комбінацій параметрів, а не у заміні нечітко-логічної моделі непрозорим алгоритмом. Як базову архітектуру використано багат шаровий перцептрон і порівняно альтернативні конфігурації за точністю, швидкістю збіжності, стійкістю навчання та здатністю до узагальнення. Такий сценарний простір дає змогу виявляти критичні поєднання параметрів, оцінювати межі стійкості та визначати компоненти, зміна яких найбільш істотно впливає на інтегральний управлінський стан.

Сформовано гібридний інтелектуальний контур, у якому нечітка логіка забезпечує змістову інтерпретованість і відтворення експертно обґрунтованих причинних залежностей, а нейромережа – оперативність масового сценарного оцінювання. Така архітектура поєднує пояснюваність моделі з прогностичною продуктивністю без втрати економічного змісту вихідних показників.

П'ятий розділ спрямовано на практичну апробацію, сценарно-аналітичну перевірку та прикладну інтерпретацію розроблених моделей. Проведено оцінювання Out1–Out5 для досліджуваних будівельних підприємств із подальшим розрахунком IDEM. Апробація підтвердила здатність моделі розпізнавати не лише крайні стани результативності, а й структурно незбалансовані конфігурації, за яких загальне значення індексу

приховує істотні відмінності між економічною, цифровою, екологічною, стейкхолдерською та організаційно-інноваційною спроможністю.

Обґрунтовано перехід від використання IDEM як рейтингового показника до його трактування як діагностико-рекомендаційного механізму. Управлінське значення має не лише підсумкова величина індексу, а компонентний профіль підприємства, характер дисбалансів, критичні обмеження та причини сформованого стану. Це дає змогу визначати пріоритетність дій і не допускати компенсації критично низької економічної, цифрової або біосферосумісної спроможності високими значеннями інших складових.

Прикладну інтерпретацію результатів диференційовано за функціональними ролями підприємств у проєктній екосистемі. Для замовника та інвестора IDEM може використовуватися для оцінювання надійності потенційного учасника й готовності до життєвоциклових зобов'язань; для девелопера та генерального підрядника – для формування збалансованої проєктної команди; для підрядника і постачальника – для визначення внутрішніх зон розвитку; для експлуатуючої організації – для оцінювання цифрової сумісності, інформаційної повноти та готовності активу до довгострокової експлуатації. Гібридна модель зберігає принцип пояснюваності: нечітко-логічний модуль залишається еталонною змістовою конструкцією, тоді як нейромережа використовується як засіб прискореного прогнозування, що особливо важливо для багаторазового сценарного аналізу та цифрових систем підтримки рішень.

Сценарна апробація підтвердила доцільність латинського гіперкубічного формування вибірки для стрес-тестування системи управління. Аналіз розподілу IDEM дає змогу оцінювати не лише очікуване значення індексу, а й ризик переходу до несприятливого стану за зміни окремих компонентів, тобто використовувати модель для попереднього порівняння управлінських альтернатив до їх фактичної реалізації.

Результатом апробації стала прикладна логіка використання економіко-цифрового інструментарію для керованого конструювання проєктної екосистеми. Вибір учасників пропонується здійснювати з урахуванням їхнього компонентного профілю, функціональної ролі, доступу до даних, спроможності управляти ризиками та відповідальності за життєвоцикловий результат. Ефективність екосистеми визначається не максимальними показниками окремого контрагента, а сумісністю та взаємодоповнюваністю спроможностей залучених підприємств. У практичній площині це перетворює компонентні дисбаланси на конкретні вимоги до партнерства, контрактні обмеження, контрольні показники та програми розвитку, що підсилює функцію IDEM як інструмента не лише діагностики, а й проєктування управлінських змін.

Одержані результати формують цілісну методологію економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва. Її концептуальний рівень визначає предмет, об'єкти і взаємозв'язки управління; онтологічний забезпечує семантичну цілісність даних, ролей і правил; методологічний формує конструкції стійкості, культури та індикативного оцінювання; інституційно-ризиковий переводить зовнішні вимоги й невизначеність у процедури відповідальності; інструментально-цифровий забезпечує простежуваність даних; нечітко-логічний і сценарно-прогностичний перетворюють різномірні параметри у пояснювані оцінки та управлінські альтернативи.

Науковий результат полягає у формуванні причинно узгодженої архітектури, у якій інституційні вимоги трансформуються у параметри, параметри забезпечуються даними і відповідальністю, дані формують часткові оцінки, часткові оцінки агрегуються в IDEM, сценарна та нейромережева компоненти визначають варіативність майбутніх станів, а результати діагностики перетворюються на адресні рішення щодо розвитку підприємства та конфігурації проєктної екосистеми.

Практична значущість інструментарію визначається можливістю його використання для оцінювання готовності підприємств до участі у проєктах біосферосумісного будівництва, відбору та зіставлення учасників, виявлення економічних, цифрових, екологічних і організаційних дисбалансів, встановлення критичних обмежень, адаптивної алокації ризиків, формування контрактних вимог і контрольних показників, стрес-тестування та попереднього моделювання наслідків управлінських альтернатив. Для відновлення України запропонована методологія створює підґрунтя переходу від переважно витратно-строкового контролю до прозорого життєвоциклового управління, у якому економічна результативність узгоджується з цифровою доказовістю, ресурсною ефективністю, декарбонізацією, відповідальністю учасників і довгостроковою суспільною цінністю активів. Запропонована методологія орієнтована на практичне використання у відборі партнерів, формуванні вимог до цифрових доказів, визначенні пріоритетів інвестицій у цифрову та екологічну модернізацію, а також у побудові сценаріїв підвищення стійкості підприємств і проєктних екосистем.

Ключові слова: економіко-цифрове управління, підприємство-стейкхолдер, біосферосумісне будівництво, проєктна екосистема, онтологічна модель управління підприємствами-стейкхолдерами, цифрова зрілість, стійкість, резильєнтність, ESG, адаптивна алокація ризиків, життєвий цикл, нечітка логіка, алгоритм Mamdani, модедь IDEM, сценарне моделювання, нейромережеве прогнозування, цифровізація, трансформація операційної діяльності підприємства.

SUMMARY

Onofriichuk O. P. Economic and Digital Models for Managing Stakeholder Enterprises in Biosphere-Compatible Construction Projects. – *Qualification scientific work, manuscript form.*

Dissertation submitted for the degree of Doctor of Economic Sciences in the speciality 08.00.04 – Economics and Management of Enterprises (by types of

economic activity). – Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The research addresses the scientific problem of developing the conceptual, ontological and methodological foundations of economic and digital management of stakeholder enterprises involved in biosphere-compatible construction projects, and of creating an integrated toolkit for assessment, scenario forecasting and intelligent support of managerial decision-making. The need for such a solution arises from the simultaneous transformation of the economic, technological, environmental and institutional environment of construction activity, in which the traditional focus on cost, time and production productivity no longer ensures sufficient manageability of long-term multi-actor projects.

A stakeholder enterprise is considered as a participant in a project ecosystem that mobilises resources, creates and uses digital data, assumes and transfers risks, performs functional roles and contributes to the creation of the economic, environmental and societal value of a built asset. Its performance is determined not only by internal efficiency, but also by data interoperability, consistency of decisions, the quality of inter-organisational coordination and the capacity to provide digitally verifiable evidence of obligations throughout the asset life cycle.

Biosphere-compatible construction is interpreted as a model for creating economic and societal value while respecting the natural, resource, social, spatial and infrastructural conditions required for territorial reproduction. This formulation shifts environmental parameters from being additional characteristics of a construction product to becoming managerial constraints, decision criteria and controlled indicators at the stages of initiation, design, procurement, construction, operation, reconstruction and completion of the asset life cycle.

The conceptual position of the research is that digital transformation acquires economic and managerial meaning only where there is a traceable link between data, decisions and outcomes. BIM, common data environments, digital twins, data spaces, analytics and artificial intelligence tools form an economic and digital management model when digital entities are linked to economic objectives,

responsible participants, rules, risks, critical thresholds and corrective procedures. The methodological logic combines stakeholder-ecosystem, project-oriented, life-cycle, risk-oriented, and indicator-and-criteria-based approaches within a closed cycle of ‘requirements and objectives – participants, processes and data – assessment – forecasting – managerial decision – verification – adjustment’. Digital data are therefore treated both as a managed economic resource and as an evidentiary basis for verifying managerial decisions, thereby linking technological transformation to measurable economic, environmental and social outcomes.

Chapter One establishes the conceptual and ontological foundations of economic and digital models for managing stakeholder enterprises. The cumulative nature of the paradigmatic development of management is substantiated: resource discipline is integrated into project-process coordination; process logic is complemented by digital data; digitalisation extends to the stakeholder ecosystem; and economic decisions become subject to life-cycle and biosphere-compatible constraints.

Five stages in the development of the management paradigm are distinguished: industrial-resource, project-process, digital-integration, stakeholder-ecosystem, and biosphere-compatible economic-digital. For each stage, the dominant object of management, coordination mechanisms, performance criteria and methodological limitations are defined. It is demonstrated that the biosphere-compatible model does not reject resource or project rationality; rather, it incorporates them into a broader system in which cost, time and productivity are aligned with digital verifiability, ecological limits, stakeholder legitimacy and the long-term value of the asset.

The conceptual and categorical apparatus of the research is further developed. A stakeholder enterprise is defined as an open, multilevel economic system that performs a specific function in creating project value, generates and uses data, mobilises resources, assumes risks and bears responsibility for the outcomes of its activities. A biosphere-compatible, stakeholder-oriented economic and digital management model is defined as an integrated system of principles, data,

procedures, institutional rules, interaction mechanisms and indicators through which an enterprise plans, coordinates, controls and adjusts the creation of construction value throughout the asset life cycle.

An ontological model of economic and digital management has been developed to overcome fragmentation of the information environment and ensure semantic consistency of data. Its structure comprises seven basic classes of managed entities: physical asset, digital asset, process, participant, resource, rule and indicator. Their interaction is organised through ontological-categorical, semantic-information, process-integration, analytical-forecasting, economic-value and data-governance contours. The architecture links a digital object with its information source, the responsible participant, rules of use, the relevant life-cycle phase and a measurable consequence. This structuring makes it possible to regard BIM, the digital twin, the common data environment and the data space as functionally differentiated components of a single management contour rather than as independent technological solutions.

The stakeholder-ecosystem component develops traditional approaches to stakeholder analysis by supplementing assessments of influence and interest with resource, interest, power, risk and data dimensions. The stakeholder enterprise is treated as a carrier of resources, information, knowledge, authority, risks, responsibility and a share of jointly created value. A dynamic revision of participant roles and significance in accordance with project life-cycle phases is substantiated.

The results of Chapter One are integrated into a conceptual and methodological platform comprising evolutionary-ontological, stakeholder-ecosystem, stability-and-culture, assessment, institutional-risk, and instrumental-digital contours. Their interaction establishes causal and logical transitions between institutional requirements, project data, participant behaviour, risks, assessment and managerial adjustment. The scientific distinctiveness of the platform lies in the fact that digital, economic, environmental and stakeholder parameters are not treated as parallel blocks; they are integrated through a shared logic of data, responsibility, risk

and verifiable outcome, thereby ensuring the methodological coherence of the subsequent models.

Chapter Two establishes the methodological basis for assessing economic and digital management and defines the parameters of the subsequent IDEM model. The methodology of stability and resilience of stakeholder enterprises is further developed. Stability denotes the capacity to maintain acceptable parameters of economic, organisational, digital and environmental performance, whereas resilience denotes the capacity to preserve critical functions, absorb the consequences of disruption, restore manageability and reconfigure resources, competences and partnership links.

Resilience is formalised through the sequence ‘anticipation – response – recovery – transformation’ and through the integration of financial, operational, investment and innovation, organisational, information and digital, and ecosystem components. Information and digital stability is distinguished as an independent characteristic reflecting the availability, reliability, interoperability, security and recoverability of critical data. An analytical study of Ukraine’s construction sector substantiated the need to assess stability through an enterprise component profile rather than through a single financial indicator or the scale of activity.

Innovation-oriented environmental corporate culture is conceptualised as an inter-organisational mechanism for reproducing environmental orientations, data-quality requirements, innovation practices and standards of responsibility across a network of participants. Drawing on international experience, regulatory-taxonomic, standardisation-verification, circular-ecosystem, eco-innovation-digital, and project-life-cycle models of its institutionalisation are identified. For the Ukrainian context, a structural-adaptive model is developed that combines European regulatory transparency, Asian implementation discipline, and American market and innovation incentives.

The non-compensatory nature of innovation-oriented environmental culture is demonstrated: a high level of innovation activity does not compensate for insufficient resource circularity; a certified management system does not

compensate for information fragmentation; and a high waste-recycling rate is not equivalent to preserving the functional value of materials. This proposition is extended to the subsequent integrated assessment, in which a critical deficit in individual components should not be fully offset by high values in others.

An indicator-and-criteria-based system of economic and digital management is developed around five resulting components: economic performance; digital maturity of management; environmental and biosphere-compatible efficiency; stakeholder- and human-centred orientation; and organisational and innovation stability. For the indicators, the economic meaning, direction of influence, data source and data owner, entity responsible for calculation and verification, update frequency and normalisation method are defined. This design eliminates situations in which a formally achieved result is assessed without verification of its information basis or the way in which it was obtained, while linking every indicator to a specific managerial action.

The indicators are differentiated into outcome, process and evidentiary indicators; non-compensatory critical constraints are established for safety, legality, environmental acceptability and data quality. A stage-gate model G1–G7 is developed, integrating assessment into the construction project life cycle and permitting transition between phases only after the sufficiency of data, compliance with critical thresholds and identification of responsible actors have been confirmed. These provisions create a methodological transition to the economic and digital management model. Consequently, the indicator-and-criteria-based system performs not only a measurement function but also a regulatory one: it makes it possible to determine whether progression to the next project phase is permissible, localise deficits in managerial capacity, and link them to the responsible participant and the relevant data source.

Chapter Three focuses on the formation of the institutional-risk and instrumental-digital management contours. It examines the transformation of external environmental, social and governance requirements into internal operating rules for the enterprise. It is substantiated that a regulatory requirement becomes a

managerial requirement only after it has been translated into a parametric directive, a critical threshold, a defined data source, assigned responsibility, a verification procedure, and a specified consequence of compliance or non-compliance.

The institutionalisation of ESG principles is substantiated through the interaction of external institutional, internal corporate and digital data-governance contours. The functions of corporate social responsibility and ESG management are differentiated: the former develops the value-based and behavioural readiness to assume commitments, while the latter operationalises those commitments through indicators, thresholds, data, materiality assessment and managerial consequences.

A recursive nine-stage mechanism for integrating ESG requirements is developed, comprising identification, materiality determination, mapping to life-cycle phases, assignment of responsibility, development of indicators and thresholds, data organisation, incorporation into decision-making, verification, and disclosure of results with feedback. A change in a regulatory criterion, project parameter, technology, participant or data quality triggers renewed passage through the relevant stages and thereby forms the institutional memory of the model.

The risk-management methodology is advanced by differentiating risk transfer from adaptive risk allocation. Transfer changes the party bearing the contractual or financial consequence, whereas adaptive allocation determines who is capable of controlling the source of risk, generating the required data, making decisions, implementing preventive measures, financing residual risk and providing external communication.

A mechanism of adaptive risk allocation is developed that combines institutional-contractual, digital-analytical and ecosystem-behavioural levels. The rationality of allocation is assessed according to controllability of the risk source, access to information, capacity to minimise consequences, legal certainty, economic motivation, life-cycle impact, social legitimacy and digital verifiability. The roles of data owner, response owner, action implementer, holder of the financial reserve and actor responsible for external communication are differentiated; a digital risk passport is proposed for formal recording.

Within the instrumental-digital strand, a functional model of digital support for the strategic objectives of biosphere-compatible construction is developed. Its core comprises a common data environment and an information model of the asset, integrated with a digital twin, monitoring, analytics, forecasting, LCA, LCC, multi-criteria choice and managerial control. The role vector eliminates ‘empty responsibility’, where a risk has a formal owner but is not supported by data, an action implementer or financial coverage. The role configuration is revised when new digital evidence emerges or when a participant’s capacity to control the source of risk changes.

A goal-traceability chain – ‘strategic objective – indicator – data source – digital tool – managerial decision – verification of outcome’ – and a five-level digital maturity framework for stakeholder enterprises are developed. Digital maturity is determined not by the number of software tools deployed, but by the capacity of the information architecture to support specific economic, environmental, social and project decisions and to ensure traceability across life-cycle phases, enterprises and management levels.

Chapter Four is devoted to formalising the toolkit for intelligent economic and digital management and to constructing the multilevel fuzzy-logic IDEM model. The use of fuzzy logic is justified by the heterogeneity of the initial parameters, which combine quantitative financial and resource indicators with qualimetric characteristics of digital maturity, stakeholder interaction, environmental responsibility, adaptability and organisational capacity. This approach shifts digitalisation from the sphere of technological equipment to that of a managed information architecture, in which every digital tool must be justified by a specific managerial function, indicator and procedure for verifying the result.

The IDEM architecture follows a two-level principle. At the lower level, the initial parameters are aggregated into five subsystems: Out1 – economic performance; Out2 – digital maturity of management; Out3 – environmental and biosphere-compatible efficiency; Out4 – stakeholder- and human-centred orientation; and Out5 – organisational and innovation stability. For each subsystem,

input variables, linguistic terms, membership functions and a fuzzy rule base are defined; the upper level provides non-linear aggregation of Out1–Out5 into IDEM using the Mamdani inference algorithm.

Unlike additive integral indicators, IDEM reproduces the configuration of interactions among partial assessments and accounts for situations in which a high level of one parameter does not eliminate a critical deficit in another. The fuzzy rules ensure interpretability of the inference process and enable the final assessment to be related to the activated combinations of input conditions.

Latin hypercube sampling is applied to test IDEM behaviour under multifactor uncertainty. A set of 3,334 scenarios is generated, each reflecting a distinct configuration of economic, digital, environmental, social and organisational characteristics. Scenario modelling is supplemented by statistical, percentile and correlation analysis, testing of the structural independence of components, and sensitivity assessment of the integral result.

On the basis of the scenario set, a neural-network module for forecasting IDEM is developed. Its purpose is to reproduce rapidly a substantively justified non-linear relationship for new parameter combinations, rather than to replace the fuzzy-logic model with an opaque algorithm. A multilayer perceptron is used as the baseline architecture, and alternative configurations are compared in terms of accuracy, convergence speed, training stability and generalisation capability. This scenario space enables critical combinations of parameters to be identified, stability boundaries to be assessed, and the components whose changes exert the strongest influence on the overall managerial state to be determined.

A hybrid intelligent contour is developed in which fuzzy logic provides substantive interpretability and reproduces expert-justified causal relationships, while the neural network enables rapid large-scale scenario assessment. This architecture combines model explainability with predictive performance without losing the economic meaning of the input indicators.

Chapter Five focuses on practical testing, scenario-analytical verification and applied interpretation of the developed models. Out1–Out5 are assessed for the

construction enterprises under study, followed by calculation of IDEM. The empirical testing confirms the model's capacity to identify not only extreme performance states, but also structurally unbalanced configurations in which the overall index value conceals substantial differences in economic, digital, environmental, stakeholder-related, and organisational and innovation capacities.

A transition is substantiated from the use of IDEM as a ranking indicator to its interpretation as a diagnostic and recommendation mechanism. Managerial significance lies not only in the final value of the index, but also in the enterprise's component profile, the nature of imbalances, critical constraints and the causes of the resulting state. This makes it possible to prioritise actions and to prevent critically low economic, digital or biosphere-compatible capacity from being offset by high values in other components.

The applied interpretation of the results is differentiated according to the functional roles of enterprises within the project ecosystem. For a client and investor, IDEM can be used to assess the reliability of a potential participant and its readiness to undertake life-cycle obligations; for a developer and main contractor, to form a balanced project team; for a contractor and supplier, to identify internal areas for development; and for an operating organisation, to assess digital compatibility, information completeness and the asset's readiness for long-term operation. The hybrid model retains the principle of explainability: the fuzzy-logic module remains the reference substantive construct, while the neural network is used as an accelerated forecasting tool, which is particularly important for repeated scenario analysis and digital decision-support systems.

Scenario-based testing confirms the appropriateness of Latin hypercube sampling for stress-testing the management system. Analysis of the IDEM distribution makes it possible to assess not only the expected value of the index, but also the risk of transition to an adverse state when individual components change, thereby enabling the model to be used for ex ante comparison of managerial alternatives before their actual implementation.

The testing results in an applied logic for using economic and digital tools to support the managed configuration of a project ecosystem. Participant selection is proposed to take account of each enterprise's component profile, functional role, access to data, risk-management capacity and responsibility for life-cycle outcomes. Ecosystem effectiveness is determined not by the maximum indicators of an individual counterparty, but by the compatibility and complementarity of the capacities of the enterprises involved. In practical terms, this converts component imbalances into specific partnership requirements, contractual constraints, control indicators and development programmes, reinforcing IDEM as an instrument not only for diagnosis but also for designing managerial change.

The results obtained form an integrated methodology for the economic and digital management of stakeholder enterprises involved in biosphere-compatible construction projects. Its conceptual level defines the subject, objects and interrelationships of management; the ontological level ensures semantic integrity of data, roles and rules; the methodological level develops constructs of stability, culture and indicator-based assessment; the institutional-risk level translates external requirements and uncertainty into procedures of responsibility; the instrumental-digital level ensures data traceability; and the fuzzy-logic and scenario-forecasting levels transform heterogeneous parameters into explainable assessments and managerial alternatives.

The scientific result consists in the development of a causally coherent architecture in which institutional requirements are transformed into parameters; parameters are supported by data and responsibility; data generate partial assessments; partial assessments are aggregated into IDEM; the scenario and neural-network components determine the variability of future states; and diagnostic results are converted into targeted decisions concerning enterprise development and the configuration of the project ecosystem.

The practical significance of the toolkit lies in its potential use for assessing enterprise readiness to participate in biosphere-compatible construction projects; selecting and comparing participants; identifying economic, digital, environmental

and organisational imbalances; establishing critical constraints; adaptively allocating risks; defining contractual requirements and control indicators; stress-testing; and ex ante modelling of the consequences of managerial alternatives. For Ukraine's reconstruction, the proposed methodology provides a basis for moving from predominantly cost-and-schedule control towards transparent life-cycle management in which economic performance is aligned with digital verifiability, resource efficiency, decarbonisation, participant accountability and the long-term societal value of assets. The methodology is intended for practical application in partner selection, the formulation of requirements for digital evidence, prioritisation of investments in digital and environmental modernisation, and the development of scenarios for strengthening the stability of enterprises and project ecosystems.

Keywords: economic and digital management, stakeholder enterprise, biosphere-compatible construction, project ecosystem, ontological model of stakeholder enterprise management, digital maturity, stability, resilience, ESG, adaptive risk allocation, life cycle, fuzzy logic, Mamdani algorithm, IDEM model, scenario modelling, neural-network forecasting, digitalisation, transformation of enterprise operations.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. **Онофрійчук О. П.** Бізнес-моделі управління підприємствами в умовах цифрової трансформації економіки: монографія. Київ: ПП «Сердюк В. Л.», 2026. 478 с.
2. Reznik, N., Gonchar, V., Kalinin, O., **Onofriichuk, O.**, & Datsiuk, P. (2025). Application of resource-saving technologies in the production activities of the food industry in Ukraine. In *The future of work: How technology is transforming jobs and skills. Studies in Systems, Decision and Control* (Vol. 291, pp. 485–497). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87372-0_42 (**Scopus, Q4**). (розділ в іноземній монографії) (71,05/0,81/0,16 д.а.) *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано засади впровадження ресурсозберігаючих технологій у діяльність підприємств-стейкхолдерів з урахуванням вимог біосферосумісності для оптимізації ресурсоспоживання та підвищення організаційно-інноваційної стійкості.*

Статті у наукових виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science:

3. Trach, R., Chupryna, I., Tormosov, R., Leshchynsky, V., Trach, Y., Ryzhakova, G., Ratnikov, D., & **Onofriichuk, O.** (2026). Decision Support Framework for Post-War Infrastructure Revitalization Using a Hybrid Fuzzy–Simulation–ANN Model. *Applied Sciences*, 16(9), 4364. <https://doi.org/10.3390/app16094364> (**Scopus, Q1**). (1,44/ 0,18 д.а.) *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано засади застосування гібридної нечіткої імітаційної нейромережевої моделі для оцінювання організаційно-інноваційної стійкості та біосферосумісної ефективності підприємств-стейкхолдерів у процесах повоєнного відновлення інфраструктури.*
4. Kalinin, O., Gonchar, V., Abliazova, N., Filipishyna, L., **Onofriichuk, O.**, & Maltsev, M. (2024). Enhancing economic security through digital transformation in investment processes: Theoretical perspectives and methodological

approaches integrating environmental sustainability. *Natural and Engineering Sciences*, 9(1), 26–45. <https://doi.org/10.28978/nesciences.1469858> (**Scopus, Q3**). (1,25 / 0,21 д.а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано засади інтеграції вимог екологічної стійкості (біосферосумісності) в економіко-цифрові моделі управління інвестиційними процесами підприємств-стейкхолдерів для забезпечення їхньої економічної безпеки.*

5. Golovchenko, O., Saiensus, M., Sorokoumov, G., **Onofriichuk, O.**, Zubko, O., & Liu, L. (2022). Management of efficiency and competitiveness of enterprises. *Economic Affairs* (New Delhi), 67(3), 317–326. <https://doi.org/10.46852/0424-2513.3.2022.24> (**Scopus, Q4**). 0,85 / 0,14 д.а.). *Особистий внесок здобувача: розроблено організаційно-економічні принципи забезпечення конкурентоспроможності підприємств-стейкхолдерів та обґрунтовано інструментарій контролінгу для узгодження інтересів в умовах глобальної невизначеності й переходу до нових економіко-цифрових моделей управління.*

Статті у наукових періодичних виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України

6. **Онофрійчук О. П.** Інтелектуальне моделювання ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами. *Вісник Східноєвропейського університету економіки і менеджменту*. 2026. № 1 (35). Том 2. С. 470-484. [https://doi.org/10.58253/2078-1628-2026-1-2\(35\)-031](https://doi.org/10.58253/2078-1628-2026-1-2(35)-031) (0,94 д.а.)

7. Kalinin, O., & **Onofriichuk, O.** (2026). Institutional mechanism for shaping the eco-oriented corporate culture of construction enterprises. *Economic Innovations*, 28(2(99)), 66-77. [https://doi.org/10.31520/ei.2026.28.2\(99\).66-77](https://doi.org/10.31520/ei.2026.28.2(99).66-77) (0,95 / 0,48 д.а.). *Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні інституційних рівнів та механізмів трансляції екологічних норм у корпоративне управління. Це формує нормативно-ціннісний базис, зокрема екоорієнтовану корпоративну культуру, для забезпечення організаційно-інноваційної стійкості підприємств-стейкхолдерів у межах функціонування економіко-цифрових моделей біосферосумісного будівництва.*

8. **Онофрійчук, О. П.** (2026). Онтологічні засади цифрової трансформації будівельної галузі. *Економічний вісник Донбасу*, 2(84), 187–195. [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2026-2\(84\)-187-195](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2026-2(84)-187-195) (0,85 д.а)
9. Клімова, І. О., **Онофрійчук, О. П.**, & Ткачук, М. В. (2026). Аналіз використання алгоритмів машинного навчання для передбачення купівельних звичок та їх вплив на ефективність маркетингових кампаній. *Актуальні питання економічних наук*, 1, 1–20. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19489031> (0,7 / 0,23 д.а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано методологічні засади застосування алгоритмів машинного навчання в економіко-цифрових моделях управління для інтелектуальної підтримки прийняття рішень, прогнозування поведінки учасників (стейкхолдерів) екосистеми та підвищення організаційно-інноваційної стійкості підприємств шляхом багатофакторного аналізу великих даних.*
10. Близнюк, С. В., & **Онофрійчук, О. П.** (2026). Персоналізований маркетинг у цифровому середовищі: виклики та можливості. *Наукові записки Львівського університету бізнесу та права*, 48, 4–15. <https://doi.org/10.66556/2663-0117.48.blyzniuk-s> (0,9 / 0,45 д.а.). *Особистий внесок здобувача: розроблено підходи до систематизації викликів індивідуалізованих комунікацій та обґрунтовано механізми інтеграції омніканальних стратегій в економіко-цифрові екосистеми управління підприємствами-стейкхолдерами для підвищення їхньої організаційно-інноваційної стійкості, оптимізації роботи з даними та управління інформаційними ризиками.*
11. Коваль, В. В., Камінський, О. Є., Редьква, О. З., **Онофрійчук, О. П.**, & Капранова, Л. Г. (2025). Цифрові платформи управління як інструмент трансформації та підвищення економічної безпеки підприємств. *Проблеми економіки*, 3, 176–185. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2025-3-176-185> (1,0 / 0,2 д. а.). *Особистий внесок здобувача: розроблено концептуальні засади формування цифрових платформ в межах економіко-цифрових екосистем підприємств-стейкхолдерів, обґрунтовано застосування мультиагентного*

економіко-математичного моделювання для підвищення організаційно-інноваційної стійкості та керованості ризиками в умовах макроекономічної невизначеності.

12. **Онофрійчук, О. П.** (2025). Економіко-цифрові моделі управління будівельними підприємствами. *Академічні візії*, (50). <https://doi.org/10.5281/zenodo.18102355> (0,8 д.а.).

13. **Onofriichuk, O.** (2025). The formation of resilience in construction enterprises under digital transformation. *Economic Bulletin of Donbas*, 4(82), 115–123. [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2025-4\(82\)-115-123](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2025-4(82)-115-123) (0,9 д.а.)

14. Коваль, В. В., **Онофрійчук, О. П.**, Капталан, С. М., Гончарова, І. М., & Локаєць, М. М. (2025). Управління розвитком інтелектуально-технологічного капіталу та персоналу підприємства в умовах цифрової трансформації. *Бізнес Інформ*, 9, 160–168. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2025-9-160-168> (0,85 / 0,17 д.а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано механізми управління інтелектуально-технологічним капіталом та адаптації персоналу як ключових факторів забезпечення стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості й організаційно-інноваційної стійкості підприємств-стейкхолдерів в умовах впровадження економіко-цифрових моделей управління.*

15. **Онофрійчук, О. П.** (2025). Управління стейкхолдер-екосистемою підприємства в проєктах біосферосумісного виробництва. *Вісник Східноєвропейського університету економіки і менеджменту*, 2(34), 435–449. [https://doi.org/10.58253/2078-1628-2025-2\(34\)-030](https://doi.org/10.58253/2078-1628-2025-2(34)-030) (0,94 д.а.).

16. **Онофрійчук, О. П.** (2025). Інституційні бар'єри та дисфункції впровадження ESG-принципів у цифрових моделях управління. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*, 348(6), 526–532. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-348-6-76> (0,85 д.а.)

17. **Онофрійчук, О. П.** (2025). Методологічні засади оцінювання ефективності економіко-цифрових моделей управління проєктами

біосферосумісного будівництва. *Український журнал прикладної економіки та техніки*, 10(4), 172–176. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-4-33> (0,45 д.а.)

18. **Онофрійчук, О. П.,** Авдейчик, О. М., Гребень, Е. І., Бригідир, П. В., Кушнірук, О. Ю., Малеш, С. В., & Веремчук, І. І. (2025). Проблеми розвитку соціально-економічної безпеки в Україні: Виклики та можливості. *Національні інтереси України*, 10(15), 881–893. [https://doi.org/10.52058/3041-1793-2025-10\(15\)-881-893](https://doi.org/10.52058/3041-1793-2025-10(15)-881-893) (0,8 / 0,11 д.а.). *Особистий внесок: досліджено інституційні та макроекономічні чинники соціально-економічної безпеки, що формують зовнішнє середовище функціонування підприємств-стейкхолдерів і визначають базові обмеження для впровадження економіко-цифрових моделей управління проєктами біосферосумісного будівництва*

19. **Онофрійчук, О. П.,** Авдейчик, О. М., Бригідир, П. В., Кушнірук, О. Ю., Малеш, С. В., & Веремчук, І. І. (2025). Економічна безпека: теоретико-методологічний аналіз. *Суспільство та національні інтереси*, 10(18), 606–615. [https://doi.org/10.52058/3041-1572-2025-10\(18\)-606-615](https://doi.org/10.52058/3041-1572-2025-10(18)-606-615) (0,6 / 0,1 д.а.). *Особистий внесок здобувача: досліджено теоретико-методологічні засади економічної безпеки як базису, що визначає інституційно-ризиковий контур макросередовища, створюючи граничні обмеження та виклики для забезпечення організаційно-інноваційної стійкості підприємств-стейкхолдерів у межах економіко-цифрових моделей управління.*

20. **Онофрійчук, О. П.,** Ліщук, Н. В., Далюк, Н. Я., Бригідир, П. В., & Соколовський, Д. І. (2024). Теоретичні основи соціально-економічної безпеки. *Актуальні питання у сучасній науці*, 6(24), 131–142. [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-6\(24\)-131-142](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-6(24)-131-142) (0,6 / 0,12 д.а.). *Особистий внесок здобувача: досліджено макроекономічні, інституційні та соціальні передумови формування соціально-економічної безпеки, що визначають зовнішнє середовище функціонування підприємств-стейкхолдерів і формують базові обмеження для їхньої стійкості в умовах екосистемних трансформацій*

21. **Онофрійчук, О. П., Яковчук, А., & Сисюк, В. І. (2024).** Теоретичні основи економічної безпеки. *Наука і техніка сьогодні*, 2(30), 375–387. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-2\(30\)-375-387](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-2(30)-375-387) (0,7 / 0,23 д.а.). *Особистий внесок здобувача: систематизовано теоретико-методологічні засади економічної безпеки як макросередовища, що визначає інституційно-правові рамки, зовнішні ризики та граничні обмеження для забезпечення організаційно-інноваційної стійкості підприємств-стейкхолдерів в умовах кризових явищ.*
22. **Онофрійчук, О. П., Коваль, Л. А., Тимчук, Б. П., Підгрушний, В. А., Гордійчук, О. Ю., & Авдейчик, О. М. (2024).** Роль та значення фінансового моніторингу у банківській діяльності. *Національні інтереси України*, 4(4), 361–369. [https://doi.org/10.52058/3041-1793-2024-4\(4\)-361-369](https://doi.org/10.52058/3041-1793-2024-4(4)-361-369) (0,6 / 0,1 д.а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано механізми інформаційно-аналітичного забезпечення та управління фінансовими ризиками, що формують зовнішній інституційний контур доказовості та впливають на стійкість фінансових потоків підприємств-стейкхолдерів в умовах цифровізації екосистемної взаємодії.*
23. **Онофрійчук, О. П., Коваль, Л. А., Яковлев, В. Ю., Підгрушний, В. А., Семенюк, В. П., & Авдейчик, О. М. (2024).** Фінансово-економічна безпека підприємства: проблеми та забезпечення в умовах війни. *Наукові інновації та передові технології*, 11(39), 980–989. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-11\(39\)-980-988](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-11(39)-980-988) (0,5 д.а. / 0,1 д.а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано механізми антикризового управління фінансовими ризиками та інструменти оцінювання ліквідності, що формують базовий економіко-безпековий контур організаційно-інноваційної стійкості підприємств-стейкхолдерів в умовах макроекономічної нестабільності.*
24. **Онофрійчук, О. П., Медведєв, І. І., Сокол, О. А., Підгрушний, В. А., Серветник, М. А., & Авдейчик, О. М. (2024).** Фінансова безпека держави. *Наукові інновації та передові технології*, 12(40), 765–776. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-12\(40\)-765-776](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-12(40)-765-776) (0,75 / 0,13 д.а.).

Особистий внесок здобувача: систематизовано макроекономічні детермінанти та загрози фінансовій безпеці держави, які формують зовнішній ризиковий контур і визначають граничні інституційні обмеження для побудови резильєнтних економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами в умовах глобальної та внутрішньої нестабільності.

25. **Онофрійчук, О. П., & Близнюк, С. В. (2023).** Інтернет-маркетинг в Україні: передумови виникнення, особливості становлення, перспективи розвитку. *Актуальні питання у сучасній науці*, 12(18), 122–131. [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2023-12\(18\)-122-131](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2023-12(18)-122-131) (0,6 / 0,3 д.а.).
Особистий внесок здобувача: систематизовано інструменти інтернет-маркетингу та цифрової взаємодії зі споживачами, що застосовано при описі комунікаційного контуру економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами в екосистемному середовищі.

26. **Онофрійчук, О. П., Антонюк, С. І., & Підгрушний, В. А. (2023).** Управління фінансовою стійкістю підприємства. *Актуальні питання у сучасній науці*, 12(18), 112–121. [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2023-12\(18\)-112-121](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2023-12(18)-112-121) (0,6 / 0,2 д.а.).
Особистий внесок здобувача: систематизовано інструментарій фінансового контролінгу, управління капіталом та податкового планування як ключових внутрішніх чинників забезпечення організаційно-інноваційної стійкості підприємств-стейкхолдерів в умовах макроекономічної нестабільності.

27. **Онофрійчук, О. П., Близнюк, С. В., & Сисюк, В. І. (2023).** Теоретичні аспекти кредитної політики комерційних банків. *Наукові інновації та передові технології*, 14(28), 718–728. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-14\(28\)-718-728](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-14(28)-718-728) (0,6 д.а. / 0,2 д.а.).
Особистий внесок здобувача: систематизовано теоретико-методологічні засади кредитної політики фінансових установ як елемента інституційного макросередовища, що детермінує доступність інвестиційних ресурсів і граничні обмеження для забезпечення фінансової стійкості підприємств-стейкхолдерів.

28. **Онофрійчук, О. П.** (2022). Еволюція парадигми управління будівельними підприємствами. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, 2(49), 346–359. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).346-359](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).346-359) (0,8 д.а.)

Матеріали конференцій, де здійснено апробацію роботи:

29. Reznik, N., Tryhubchenko, A., Gonchar, V., Kalinin, O., Onikiienko, N., & **Onofriichuk, O.** (2026). The effect of price risk impact on entrepreneurial structures depending on their size. In Digital horizons: Reimagining business in the tech era: Proceedings of ICBT 2025, Volume 2 (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1570, pp. 347–356). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00329-4_31 (Scopus, Q4). (0,63/ 0,1 д.а.) *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано механізми оцінювання впливу цінових ризиків на діяльність підприємств-стейкхолдерів різного масштабу для підвищення їхньої економічної стійкості та розроблення адаптивних систем управління у межах реалізації проєктів біосферосумісного будівництва.*

30. **Онофрійчук О. П., Васильчук Є.** Штучний інтелект у цифровій економіці: ефективність, загрози та виклики. *Інновації партнерської взаємодії освіти, економіки та соціального захисту в умовах інклюзії та прагматичної реабілітації соціуму: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції.* (м. Кам'янець-Подільський, 21-22 травня 2026 р.). С. 414 -415. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування регуляторних і корпоративних передумов відповідального використання ШІ в цифровій економіці.*

31. **Онофрійчук О. П.** Адаптивна алокація ризиків між підприємствами-стейкхолдерами у цифровій екосистемі будівельного проєкту. *Міжнародні тенденції та перспективи розвитку в освіті та науці в умовах глобалізації: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції до 100-річчя академіка Степана Дем'янчука* (м. Рівне, 13 листопада 2025 р.). Рівне, 2025. С. 311–314.

32. Laktionova, O., Ismailov, T., Kalinin, O., Gonchar, V., & **Onofriichuk, O.** (2024). Digitalization and management of crypto assets as a source of investment for “green” projects. *E3S Web of Conferences*, 558, Article 01028.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455801028>, eISSN: 2267-1242, (**Scopus, Q4**) (0,59 д. а. / 0,12 д. а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано умови використання цифрових фінансових активів як додаткового джерела фінансування екологічно орієнтованих проєктів.*

33. Мекіса, Ю. О., & **Онофрійчук, О. П.** (2024). Вплив цифрової трансформації на досягнення цілей сталого розвитку в закладах соціальної сфери. *Соціальне забезпечення та соціальна робота в умовах сучасних викликів: Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції*, (15 листопада 2024 року, м. Хмельницький). С. 41–43. (0,2 / 0,1 д.а.). *Особистий внесок здобувача: визначено напрями інтеграції цифрових технологій у реалізацію цілей сталого розвитку, що стало концептуальним підґрунтям для поєднання цифрової зрілості, екологічної результативності та стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості в оцінюванні економіко-цифрового управління.*

34. Ліщук, Н. В., Близнюк, С. В., Попик, Ю. І., Авдейчик, О. М., & **Онофрійчук, О. П.** (2024). Аналіз причин бюджетного дефіциту та його наслідки для національної економіки країни. *Contemporary Challenges of Society and Ways to Overcome Them: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, Tallinn, Estonia, January 30–February 2, 2024* P. 54–57. (0,2 / 0,04 д.а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано причинно-наслідкові зв'язки між бюджетним дефіцитом, зміною параметрів макроекономічної стійкості та фінансовими обмеженнями суб'єктів господарювання, що враховано під час формування сценарно-аналітичних положень оцінювання стійкості підприємств-стейкхолдерів.*

35. **Онофрійчук, О. О.** Контурно-шлюзовий підхід до оцінювання ефективності економіко-цифрових моделей управління у проєктах біосферосумісного будівництва. *Актуальні проблеми та перспективи розвитку регіонів: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Рівне, 23 червня 2023 р.). Рівне : РВЦ МЕГУ ім. акад. С. Дем'янчука, 2023. С. 53-56. (0,28 д.а.)

36. Бережницька, В. Д., Ільчук, К. В., & **Онофрійчук, О. П.** (2022). Вплив процесу глобалізації на систему оподаткування як складову інституційного середовища. *Актуальні проблеми економіки, фінансів, обліку та права в XXI столітті: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції*, (Полтава, 15 квітня 2022 року). Полтава, 2022. С. 21–23). ЦФЕНД. (0,2 д.а. / 0,7 д.а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано напрями трансформації податкового регулювання під впливом глобалізаційних процесів, що стало підґрунтям для врахування інституційних вимог і регуляторних обмежень у формуванні інституційно-ризикового контуру економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами.*

37. Ліщук Н. В., **Онофрійчук О. П.**, Близнюк С. В., Сторожук В. В., Шеверда Л. Л. (2022). Валютне регулювання експортних та імпорتنих операцій суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності. *Actual Priorities of Modern Science, Education and Practice: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference*, (Paris, France, March 29–April 1, 2022). pp. 200–205. (0,4 д.а. / 0,08 д.а.). *Особистий внесок здобувача: систематизовано інструменти валютного регулювання експортно-імпорتنих операцій та визначено їхній вплив на фінансову стійкість підприємств, що використано під час обґрунтування зовнішніх ризиків, фінансових обмежень і адаптивних управлінських рішень у діяльності підприємств-стейкхолдерів.*

38. Коваль, Л. А., Ліщук, Н. В., Козак, С. В., Лук'янчук, Ю. Ф., & **Онофрійчук, О. П.** (2022). Німецьке економічне диво. *Multidisciplinary Academic Research, Innovation and Results: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference*, (Prague, Czech Republic, April 5–8, 2022). pp. 197–205. (0,4 д.а. / 0,08 д.а.). *Особистий внесок здобувача: узагальнено інституційні, інвестиційні та організаційні чинники повоєнного відновлення економіки Німеччини, що сформувало аналітичне підґрунтя для визначення умов стійкого відновлення підприємств і розвитку проєктних екосистем у період структурних трансформацій.*

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати:

39. Артюшок, К. А., Гончаров, Ю. В., Артюшок, В. С., Ліщук, Н. В., **Онофрійчук, О. П., & Шпотюк, А. М.** (2025). Адаптація системи управління еколого-економічними відносинами до умов інноваційної економіки: монографія. Рівне: Ю. Кукса, 2025. 490 с.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.17201728> *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано напрями адаптації управління еколого-економічними відносинами до цифрових та інноваційних змін.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	38
РОЗДІЛ 1. КОНЦЕПТУАЛЬНО-ОНТОЛОГІЧНА ПЛАТФОРМА ФОРМУВАННЯ ЕКОНОМІКО-ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВАМИ-СТЕЙКХОЛДЕРАМИ ПРОЄКТІВ БІОСФЕРОСУМІСНОГО БУДІВНИЦТВА.....	54
1.1. Парадигмізація управління підприємствами-стейкхолдерами: від індустріально-ресурсних до цифрових, екосистемних і біосферосумісних моделей.....	54
1.2. Онтологічна архітектоніка економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами проєктних екосистем.....	69
1.3. Теоретико-методологічні засади управління екосистемою підприємств-стейкхолдерів проєктів біосферосумісного будівництва	91
Висновки до розділу 1.....	120
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНИЙ БАЗИС ФОРМУВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІКО-ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВАМИ-СТЕЙКХОЛДЕРАМИ.....	123
2.1. Методологічна архітектоніка стійкості та резильєнтності підприємств-стейкхолдерів у проєктній екосистемі біосферосумісного будівництва.....	123
2.2. Інноваційно-екологічна корпоративна культура підприємств- стейкхолдерів: міжнародні моделі та напрями адаптації.....	162
2.3. Індикативно-критеріальна система та методичний інструментарій оцінювання економіко-цифрового управління підприємствами- стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва.....	188
Висновки до розділу 2.....	218
РОЗДІЛ 3. ІНСТРУМЕНТАЛЬНО-ЦИФРОВІ КОНТУРИ УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВАМИ-СТЕЙКХОЛДЕРАМИ ПРОЄКТІВ БІОСФЕРОСУМІСНОГО БУДІВНИЦТВА.....	223
3.1. Інституціоналізація ESG-принципів і корпоративної соціальної відповідальності в управлінні підприємствами-стейкхолдерами.....	223

3.2 Архітектоніка алокації та управління ризиками підприємств-стейкхолдерів у цифрових екосистемах будівельних проєктів.....	243
3.3. Цифровий інструментарій реалізації стратегічних цілей проєктів біосферосумісного будівництва.....	266
Висновки до розділу 3.....	293
РОЗДІЛ 4. НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ФОРМУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЕКОНОМІКО-ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВАМИ-СТЕЙКХОЛДЕРАМИ.....	296
4.1. Формування архітектоніки багаторівневої нечітко-логічної моделі IDEM оцінювання економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами.....	296
4.2. Імітаційно-сценарне моделювання інтегрального індексу IDEM в умовах багатофакторної невизначеності.....	350
4.3. Нейромережеве моделювання та формування предиктивного модуля підтримки управлінських рішень за індексом IDEM.....	371
Висновки до розділу 4.....	390
РОЗДІЛ 5. НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВАМИ-СТЕЙКХОЛДЕРАМИ ПРОЄКТІВ БІОСФЕРОСУМІСНОГО БУДІВНИЦТВА.....	392
5.1. Прикладна апробація багаторівневої нечітко-логічної моделі та інтегрального індексу IDEM для підприємств-стейкхолдерів.....	392
5.2. Аналітична верифікація, оцінювання стійкості та сценарна інтерпретація інтегрального індексу IDEM.....	415
5.3 Формування нейромережевої моделі прогнозування IDEM у системі підтримки управлінських рішень.....	442
Висновки до розділу 5.....	491
ВИСНОВКИ.....	494
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	503
ДОДАТКИ.....	544

ВСТУП

Актуальність теми. Будівельна діяльність формує просторову, виробничу та інфраструктурну основу економічного розвитку, водночас відзначається високою ресурсоемністю, значним екологічним навантаженням і довготривалими наслідками управлінських рішень. Для України вагомість будівельної сфери посилюється масштабами повоєнного відновлення, потребою модернізації критичної та соціальної інфраструктури, а також необхідністю наближення державної будівельної політики до вимог Європейського Союзу у сфері декарбонізації, енергоефективності, цифрової прозорості та життєвоциклового управління. За таких умов традиційна ресурсоемна модель будівництва не забезпечує належної стійкості підприємств, територій і проєктних систем, що актуалізує перехід до біосферосумісного будівництва.

Біосферосумісне будівництво доцільно трактувати не як сукупність окремих екологічних технологій, а як спосіб організації стейкхолдер-орієнтованої екосистеми, у межах якої економічні інтереси, ресурсні обмеження, екологічні вимоги, цифрові дані, ризики та відповідальність учасників узгоджуються протягом життєвого циклу проєкту. Реалізація таких проєктів потребує координації замовників, інвесторів, девелоперів, проєктних і підрядних організацій, постачальників, експлуатуючих підприємств, органів публічної влади та територіальних громад. Результативність проєкту визначається не лише внутрішньою ефективністю окремого підприємства, а й узгодженістю рішень, сумісністю даних, якістю міжорганізаційної взаємодії та обґрунтованим розподілом ризиків і відповідальності.

Цифрові технології створюють передумови для переходу від фрагментарного адміністрування до інтегрованого управління проєктною екосистемою. Інформаційне моделювання будівель, цифрові двійники, спільні середовища даних, інтелектуальна аналітика та нейромережеве моделювання забезпечують синхронізацію інформаційних потоків, раннє виявлення відхилень і попереднє оцінювання наслідків управлінських рішень. Водночас

локальне впровадження цифрових інструментів не приводить до якісної трансформації управління без їх поєднання з економічними критеріями, ESG-вимогами, параметрами стійкості та резильєнтності, механізмами стейкхолдерської координації та життєвоцикловими показниками. Відповідна методологічна прогалина зумовлює потребу у формуванні економіко-цифрових моделей, у яких дані набувають статусу управлінського ресурсу, а результати оцінювання стають основою сценарного прогнозування, порівняння альтернатив і коригування управлінських рішень.

Теоретичні засади управління стейкхолдерами сформовано у працях Р. Акоффа, Р. Е. Фрімена, Т. Дональдсона, Р. Мітчелла; екосистемну проблематику розвинуто Дж. Муром і Р. Аднером; питання цифрової трансформації досліджували Е. Бріньолфссон, Т. Девенпорт і М. Портер; засади сталого розвитку та екологічно-орієнтованого будівництва висвітлено у працях Дж. Елкінгтона, К. Голлінга та Ч. Кіберта. Проблеми економіки, цифровізації, стійкості та стейкхолдер-орієнтованого управління будівельними підприємствами розкрито у працях О. Ю. Беленкової, В. Ю. Божанової, О. М. Гуцалюка, Т. А. Гончаренко, Л. О. Згалат-Лозинської, І. С. Івахненко, І. В. Новикової, В. О. Поколенка, Н. П. Резнік, Г. М. Рижаквої, І. В. Поповиченко, М. П. Сагайдака, С. П. Стеценка, Р. В. Трача, Ю. А. Чуприни, О. М. Хоменка, Г. В. Шпакової та інших науковців.

Попри значний науковий доробок, наявні підходи залишаються методологічно роз'єднаними. Цифровізація часто зводиться до впровадження окремих технологій, стійкість – до фінансово-економічної характеристики підприємства, ESG – до формату нефінансової звітності, екологічність – до оцінювання впливів упродовж життєвого циклу операційної діяльності будівельного підприємства із застосуванням LCA (Life Cycle Assessment), управління стейкхолдерами – до процедур узгодження їхніх інтересів, а ризик-менеджмент – до відокремленого контуру проєктного управління. Недостатньо розроблено онтологічні засади опису керованих сутностей і зв'язків, методологію інтеграції економічних, цифрових, екологічних,

соціальних та організаційних параметрів, індикативно-критеріальну систему оцінювання, способи опрацювання нечітких даних, а також інструменти сценарного та інтелектуального обґрунтування рішень.

Проблематика полягає у відсутності цілісної концептуально-онтологічної, методологічної та інструментально-аналітичної основи формування і реалізації економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва, яка поєднувала б економічну результативність, цифрову зрілість, екологічну та біосферосумісну ефективність, стійкість і резильєнтність, ESG-вимоги, адаптивну алокацію ризиків, сценарне прогнозування та інтелектуальну підтримку управлінських рішень. Розв'язання зазначеної проблеми визначило вибір теми, мету, завдання та внутрішню логіку дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконано у взаємозв'язку з науково-дослідними роботами ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» і ПВНЗ «Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука». У межах теми ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» «Антикризове управління бізнесом в умовах природних і техногенних надзвичайних ситуацій» (номер державної реєстрації 0120U104643) особистий внесок здобувача полягав в обґрунтуванні методологічних засад забезпечення стійкості та резильєнтності підприємств-стейкхолдерів, розробленні положень щодо адаптивної алокації ризиків у проєктних екосистемах і формуванні сценарно-аналітичного інструментарію підтримки управлінських рішень за умов багатофакторної невизначеності. За темою «Діджиталізація фінансово-кредитної та облікової діяльності України» (номер державної реєстрації 0125U003619) автором сформовано положення цифрового інформаційно-аналітичного контуру управління, індикативно-критеріальну систему оцінювання та методичний інструментарій інтегральної діагностики економічних, цифрових, екологічних і управлінських параметрів діяльності підприємств-стейкхолдерів. У межах науково-дослідної теми ПВНЗ

«Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука» «Стратегічне управління розвитком бізнес-організацій» (номер державної реєстрації 0124U001725) особистий внесок здобувача полягає у формуванні концептуально-онтологічної платформи економіко-цифрового управління, обґрунтуванні засад стратегічної координації підприємств-стейкхолдерів у проєктній екосистемі та розробленні інструментарію інтелектуальної підтримки управлінських рішень. За темою «Фінансові та економічні аспекти регіонального розвитку в сучасних умовах» (номер державної реєстрації 0124U001671) автором обґрунтовано положення щодо узгодження економічних, екологічних та інституційних параметрів діяльності підприємств-стейкхолдерів проєктів біосферосумісного будівництва, визначено напрями адаптації ESG-принципів і низьковуглецевих практик до завдань відновлення та сталого розвитку підприємств, а також сформовано методичні засади оцінювання результативності економіко-цифрових моделей управління.

Метою роботи є розроблення та наукове обґрунтування концептуально-онтологічних і методологічних засад формування та реалізації економіко-цифрових моделей з подальшим формуванням науково-методичного інструментарію управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва, що забезпечують інтегроване оцінювання, сценарне прогнозування та інтелектуальну підтримку управлінських рішень щодо підвищення економічної результативності, цифрової зрілості, біосферосумісної ефективності, стійкості та резильєнтності їх функціонування у мультіпроєктних екосистемах.

Для досягнення поставленої мети визначено такі **завдання дослідження**:

1) розкрити закономірності парадигмізації управління підприємствами-стейкхолдерами шляхом систематизації кумулятивного переходу від індустриально-ресурсної до проєктно-процесної, цифрово-інтеграційної, стейкхолдерорієнтованої та біосферосумісної економіко-цифрової моделей;

2) концептуалізувати онтологічну архітектуру економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами через виокремлення класів керованих сутностей, контурів їх інтеграції, семантичних зв'язків, правил використання даних і механізмів забезпечення довіри;

3) обґрунтувати теоретико-методологічний базис управління екосистемою підприємств-стейкхолдерів проєктів біосферосумісного будівництва з урахуванням динамічної зміни ролей учасників, узгодження їхніх інтересів та розподілу ресурсів впродовж життєвого циклу проєкту;

4) інтегрувати еволюційно-онтологічні та стейкхолдер-орієнтовані положення у цілісну концептуально-онтологічну платформу формування економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами, яка поєднує стійкісно-культурний, оцінювальний, інституційно-ризиковий та інструментально-цифровий контури у замкненому циклі формування цілей, взаємодії, оцінювання, прогнозування та управлінського коригування;

5) визначити методологічну архітектуру стійкості та резильєнтності підприємств-стейкхолдерів через взаємозв'язок фінансової, операційної, інвестиційно-інноваційної, організаційної, інформаційно-цифрової та екосистемної складових і динамічних здатностей;

6) систематизувати міжнародні моделі інноваційно-екологічної корпоративної культури та обґрунтувати напрями їх адаптації до діяльності підприємств-стейкхолдерів і потреб біосферосумісного відновлення України;

7) операціоналізувати параметри економіко-цифрового управління через формування індикативно-критеріальної системи за критеріями економічної результативності, цифрової зрілості, екологічної та біосферосумісної ефективності, стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості й організаційно-інноваційної стійкості;

8) обґрунтувати механізм інституціоналізації ESG-принципів і корпоративної соціальної відповідальності через взаємодію зовнішнього інституційного, внутрішнього корпоративного та цифрового контурів;

9) розробити механізм адаптивної алокації ризиків між підприємствами-стейкхолдерами у цифровій екосистемі будівельного проєкту з визначенням рівнів, критеріїв, функціональних ролей і порядку перегляду ризикової відповідальності;

10) сформувати функціональну модель цифрового інструментарію реалізації стратегічних цілей проєктів біосферосумісного будівництва на основі інтеграції спільного середовища даних, інформаційної моделі об'єкта, цифрового двійника та аналітико-прогнозних модулів;

11) формалізувати багаторівневу нечітко-логічну модель IDEM інтегрального оцінювання економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами на основі структурування вхідних параметрів і функціональних підсистем, функцій належності, бази нечітких правил та алгоритму Mamdani;

12) здійснити сценарно-аналітичне оцінювання стійкості індексу IDEM в умовах багатофакторної невизначеності на основі латинського гіперкубічного формування вибірки, нечітко-логічного моделювання та аналізу чутливості для визначення можливих станів і критичних комбінацій параметрів;

13) побудувати та валідувати нейромережевий модуль прогнозування індексу IDEM із вибором конфігурації багатошарового перцептрона та визначенням умов його інтеграції у цифрову систему підтримки управлінських рішень;

14) апробувати механізм діагностичної інтерпретації IDEM на вибірці підприємств-стейкхолдерів, виявити структурні дисбаланси та обґрунтувати диференційовані управлінські рішення відповідно до їх функціональних ролей у проєктній екосистемі.

Об'єкт дослідження – процес формування економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами у проєктних екосистемах біосферосумісного будівництва в умовах цифрової трансформації, багатофакторної невизначеності та посилення екологічних та інституційних вимог.

Предмет дослідження – сукупність теоретико-методологічних положень, концептуально-онтологічних засад, методів, критеріїв та інструментарію формування економіко-цифрових моделей, побудови базису інтегрального оцінювання, сценарного прогнозування та інтелектуальної підтримки управлінських рішень щодо діяльності підприємств-стейкхолдерів проєктів біосферосумісного будівництва.

Методи дослідження. Методологічну основу дослідження становлять стейкхолдер-орієнтований, проєктно-орієнтований, життєвоцикловий, ризик-орієнтований та індикативно-критеріальний підходи, поєднання яких забезпечило перехід від теоретичного осмислення економіко-цифрового управління до його формалізації, оцінювання, сценарного аналізу та інтелектуальної підтримки рішень. Для розв’язання поставлених завдань використано: історико-логічний, порівняльний і структурно-функціональний аналіз – для систематизації еволюції управлінських парадигм, уточнення понятійного апарату та обґрунтування концептуально-онтологічної платформи (підрозділи 1.1–1.3); онтологічне і стейкхолдерське моделювання – для структурування керованих сутностей, цифрових зв’язків, ролей, ресурсів і відповідальності учасників проєктної екосистеми (підрозділи 1.2, 1.3); індикативно-критеріальне структурування, експертне оцінювання (підрозділ 2.3); інституційний і ризик-аналіз, рольове картування та багатокритеріальне зіставлення – для операціоналізації ESG-вимог і розроблення механізму адаптивної алокації ризиків (підрозділи 3.1, 3.2); функціональне й інформаційне моделювання – для побудови цифрового інструментарію реалізації стратегічних цілей проєктів біосферосумісного будівництва (підрозділ 3.3). Апарат нечіткої логіки, алгоритм Mamdani та дефазифікацію використано для формалізації багаторівневої моделі IDEM (підрозділ 4.1); латинське гіперкубічне формування вибірки, сценарне моделювання, статистичний аналіз і оцінювання чутливості – для дослідження варіативності та стійкості інтегрального результату (підрозділи 4.2, 5.2); методи машинного навчання і багатошаровий перцептрон – для побудови

нейромережевого модуля апроксимації та сценарного прогнозування IDEM (підрозділи 4.3, 5.3). Практичну апробацію, компонентне оцінювання, ранжування та діагностичну інтерпретацію застосовано для перевірки працездатності моделі та формування адресних управлінських рішень (підрозділ 5.1).

Інформаційну базу дослідження становили нормативно-правові акти України, національні та міжнародні стандарти у сфері будівництва, цифровізації, ESG та оцінювання життєвого циклу; офіційні статистичні та аналітичні матеріали Державної служби статистики України, профільних міністерств, Eurostat, OECD і Світового банку; фінансова, управлінська, нефінансова та екологічна звітність будівельних підприємств; наукові праці вітчизняних і зарубіжних дослідників; матеріали інформаційно-аналітичних агентств, офіційні електронні ресурси та відкриті бази даних; результати експертного оцінювання, авторських розрахунків, нечітко-логічного, сценарного та нейромережевого моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у формуванні концептуально-методологічного базису, моделей, механізмів та інструментарію економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва. Наукова новизна одержаних результатів розкривається у таких положеннях:

вперше:

– обґрунтовано концептуально-онтологічну платформу формування економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва, яка інтегрує еволюційно-онтологічний, стейкхолдерсько-екосистемний, економіко-діагностичний, аналітично-інтерпретаційний, інструментально-цифровий та ризико-орієнтовний контури у замкнений процесний цикл «вимоги та цілі – взаємодія та дані – оцінювання і прогнозування – управлінське коригування». На відміну від підходів, у яких цифровізація, біосферосумісність, стійкість, ризики та взаємодія заінтересованих сторін розглядаються відокремлено, платформа

встановлює причинно-логічні переходи між інституційними вимогами, проєктними даними, поведінкою учасників, результатами оцінювання та коригувальними рішеннями, формуючи єдину методологічну основу побудови та узгодження багаторівневої моделі IDEM (Integrated Digital-Economic Management);

– сформовано індикативно-критеріальну систему оцінювання економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва, яка інтегрує економічну результативність, цифрову зрілість, екологічну та біосферосумісну параметризацію, стейкхолдерно-людиноцентричну орієнтованість та організаційно-інноваційну стійкість операційної діяльності. Система розмежовує показники результату, процесу та доказовості, закріплює їх за фазами життєвого циклу, джерелами і власниками даних, установлює правила нормування, зважування, формування часткових індексів та некомпенсаційних (ESG) критичних обмежень, що в порівнянні з відокремленим оцінюванням фінансових, цифрових або екологічних параметрів дає змогу виявляти структурні дисбаланси, обґрунтовувати цільові траєкторії та включати результати вимірювання до циклу управлінського коригування;

– побудовано багаторівневу нечітко-логічну модель IDEM для оцінювання ефективності економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва, яка агрегує кількісні та кваліметричні вхідні параметра у п'ять функціональних підсистем (економічна результативність, цифрова зрілість управління, екологічна та біосферосумісна ефективність, стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість, організаційно-інноваційна стійкість), що формує інтегральний індекс за алгоритмом Mamdani. На відміну від лінійного агрегування, модель відтворює експертно обґрунтовані правила, нелінійну взаємодію складових і некомпенсаційний вплив критично низьких значень окремих компонентів на підсумкову оцінку, що підвищує змістову інтерпретованість результатів і точність діагностики управлінського стану підприємства-стейкхолдера;

удосконалено:

– онтологічну архітектуру економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами, у якій виокремлено сім класів керованих сутностей - фізичний актив, цифровий актив, процес, учасник, ресурс, правило та інтегрований показник - пов'язано з онтологічно-категоріальним, семантико-інформаційним, процесно-орієнтовним, аналітико-прогнозним, економіко-ціннісним контурами та проектно-інтегрованим контуром врядування даними та довіри. Її відмінність полягає у переході від інструментального трактування цифровізації до формалізованого опису взаємозв'язків між цифровими об'єктами, ролями, правилами, рішеннями та вимірюваними результатами, що забезпечує семантичну узгодженість даних і простежуваність управлінських рішень упродовж життєвого циклу будівельного проєкту;

– модель динамічного управління екосистемою підприємств-стейкхолдерів проєктів біосферосумісного будівництва через поєднання контурів ідентифікації учасників, узгодження інтересів, спільного прийняття рішень, цифрової доказовості та оцінювання життєвого циклу, що полягає у ідентифікації підприємств-стейкхолдерів як носіїв ресурсів, даних, знань, директивних параметрів проєкту, відповідальності, легітимності та частини спільно створюваної цінності, ролі, значущість яких змінюються залежно від стадії (фази життєвого циклу) проєкту та підґрунтя координації внесків учасників, спільного управління (оцінювання) ризиками розподілених результатів проєкту;

– методологічний конструкт резильєнтності підприємств-стейкхолдерів проєктів біосферосумісного будівництва шляхом інтеграції фінансової, операційної, інвестиційно-інноваційної, організаційної, інформаційно-цифрової та екосистемної складових із послідовністю динамічних компонент «передбачення – реагування – реконфігурація – трансформація» у форматі здатності підтримувати функціональну цілісність, перебудовувати

конфігурацію ресурсів і зв'язків та відновлювати проєктну спроможність в умовах невизначеності;

– сценарно-аналітичну технологію оцінювання стійкості економіко-цифрового управління, яка поєднує латинське гіперкубічне формування вибірки, багаторівневу нечітко-логічну модель IDEM, статистичний і перцентильний аналіз, перевірку структурної незалежності складових та визначення чутливості інтегрального індексу до зміни функціональних компонентів. На відміну від одноразового детермінованого розрахунку, IDEM досліджується як розподіл можливих станів, що дає змогу встановлювати межі стійкості, критичні поєднання параметрів, траєкторії погіршення результату та пріоритетні напрями коригувального впливу;

– функціональну модель цифрового забезпечення стратегічних цілей проєктів біосферосумісного будівництва шляхом формування цифрового ядра на основі спільного середовища даних та інформаційної моделі об'єкта і поєднання функцій моделювання, поточного моніторингу, цифрового двійника, аналітики й прогнозування, оцінювання життєвого циклу, багатокритеріального вибору та управлінського контролю. Порівняно з оцінюванням технологій за самим фактом їх застосування управлінська цінність цифрового інструмента визначається його місцем у ланцюгу «стратегічна ціль – показник – джерело даних – цифровий інструмент – управлінське рішення – верифікація результату», що забезпечує простежуваність впливу цифровізації на результати впровадження проєкту;

– діагностико-рекомендаційний механізм інтерпретації результатів IDEM, який передбачає формування компонентного профілю управлінського стану, встановлення директивних значень досягнутого рівня, виявлення структурних дисбалансів і перехідних станів та перетворення результатів оцінювання на диференційовані управлінські рішення, що пов'язує виявлені відхилення з функціями і відповідальністю замовників, девелоперів, проєктувальників, підрядників, постачальників та експлуатуючих організацій,

що дає змогу визначати адресні заходи підвищення економічної, цифрової, екологічної та організаційної спроможності учасників проєкту;

набули подальшого розвитку:

– концептуальні засади еволюційної періодизації парадигм управління підприємствами-стейкхолдерами через обґрунтування кумулятивного переходу від індустріально-ресурсної до проєктно-процесної, цифрово-інтеграційної, стейкхолдерсько-екосистемної та біосферосумісної економіко-цифрової моделей, де на відміну від лінійних трактувань, кожний наступний етап не витісняє попередній, а розширює склад об'єктів управління, критерії результативності та механізми координації. На цій основі уточнено зміст понять «підприємство-стейкхолдер проєкту біосферосумісного будівництва» та «біосферосумісна стейкхолдерсько орієнтована економіко-цифрова модель управління»;

– принципи каузальної операціоналізації інструментально-діагностичного та аналітично-інтерпретаційного контурів економіко-цифрового управління за сценарним підходом «вимога – параметрична директива – фактичні дані – ризик – управлінське рішення – верифікований результат» в контексті регламенту побудови моделі IDEM: формалізовані показники, пороги, карти відповідальності, правила якості даних і процедури коригування, що створює узгоджений базис для нечітко-логічного, сценарного та прогнозного моделювання;

– методологічні підходи до адаптивної алокації ризиків у цифровій екосистемі будівельних проєктів, що поєднує інституційно-контрактний, економіко-діагностичний, цифрово-аналітичний та екосистемно-поведінковий рівні, який передбачає розподіл відповідальності за критеріями контрольованості джерела ризику, доступу до даних, спроможності мінімізувати наслідки, правової визначеності, економічної мотивації, життєвоциклового впливу, соціальної легітимності та цифрової перевірюваності, що дозволяє здійснити розмежування ролей власника даних, відповідального за реагування, виконавця заходу, носія резерву та суб'єкта

зовнішньої комунікації, а також у перегляді їх повноважень за зміни цифрових доказів і параметрів проєкту, що замінює статичне договірне перенесення ризику економічно обґрунтованим розподілом здатності запобігати подіям і скорочувати сукупні втрати проєкту;

– структурно-адаптаційну модель інноваційно-екологічної корпоративної культури підприємства-стейкхолдера, у якій узгоджено ціннісний, управлінсько-процедурний і поведінковий рівні, шість структурних складових культури та механізми їх перетворення на норми проєктної поведінки. Відмінною рисою моделі є поєднання європейської нормативної прозорості, азійської організаційної дисципліни й американської ринкової мотивації з урахуванням інституційних та ресурсних умов повоєнного відновлення економіки України, що забезпечує взаємозв'язок між технологічними змінами, цифровою доказовістю, екологічною відповідальністю та поведінкою учасників проєкту;

– прогностичні засади нейромережевої апроксимації IDEM через поєднання нечітко-логічної моделі, сценарного формування навчальної вибірки та експериментального добору багат шарового перцептрона за критеріями точності, швидкості збіжності, стійкості навчання, здатності до узагальнення й характеру помилок у різних діапазонах значень. На відміну від ізольованого нейромережевого моделювання, економіко-цифрова прогностична модель відтворює експертно обґрунтовану нелінійну логіку IDEM, забезпечує оперативне оцінювання наслідків управлінських альтернатив і може бути інтегрована у цифрові системи підтримки рішень щодо готовності підприємств-стейкхолдерів до участі у проєктах біосферосумісного будівництва.

Практичне значення одержаних результатів полягає у формуванні цілісного науково-методичного інструментарію економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва, призначеного для узгодження економічних, цифрових, екологічних, соціальних та організаційних параметрів упродовж життєвого

циклу будівельного об'єкта. Запропоновані моделі, механізми та методичні рішення дають змогу структурувати дані про активи, процеси, ресурси, ролі й відповідальність учасників, оцінювати управлінську спроможність підприємств за моделлю IDEM, виявляти критичні відхилення, здійснювати сценарне прогнозування наслідків управлінських альтернатив, адаптивно розподіляти ризики та формувати адресні коригувальні заходи. Використання авторських розробок сприяє підвищенню прозорості й доказовості управлінських процедур, узгодженості міжорганізаційної взаємодії, керованості ресурсоспоживання, стійкості постачань та обґрунтованості вибору проектних, конструктивних і технологічних рішень з урахуванням вимог енергоефективності, екологічної безпеки та довгострокової цінності будівельного активу.

Практичне використання одержаних наукових результатів підтверджено документами громадської організації «Неріо» (довідка № 05-16/24 від 16.05.2024 р.); ТзОВ фірми «Екорембуд ЛТД» (акт № 09-17/24 від 17.09.2024 р.); ТОВ «Естет Буд Ком» (довідка № 02-12/25 від 12.02.2025 р.); ТзОВ «Архпростір Про» (довідка № 05-27/25 від 27.05.2025 р.); ТОВ «Екобудоснова» (довідка № 09-18/25 від 18.09.2025 р.); ПМПФ «Спецрембуд» (акт № 12-11/25 від 11.12.2025 р.); ТОВ «Пробудтранс» (довідка № 02-19/26 від 19.02.2026 р.); Управління капітального будівництва виконавчого комітету Рівненської міської ради (акт № 04-09/26 від 09.04.2026 р.).

Практичне впровадження охопило експертно-аналітичний супровід містобудівних ініціатив, екологічну реконструкцію будівель, цифрову координацію генпідрядних робіт, інформаційне моделювання, геотехнічний супровід, планування капітального ремонту, транспортно-логістичне забезпечення та управління муніципальними проектами відбудови. Одержані результати полягають у підвищенні простежуваності управлінських рішень, зменшенні неузгодженостей у виробничих даних, посиленні контролю екологічних і геотехнічних ризиків, скороченні часу реагування на порушення

постачань, упорядкуванні процедур погодження та підвищенні прозорості використання ресурсів.

Окремі результати дослідження впроваджено в освітній процес ПВНЗ «Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука» під час підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальностями D3, D2, C1. Концептуально-онтологічні засади економіко-цифрового управління, індикативно-критеріальну систему оцінювання, модель IDEM, положення щодо управління підприємствами-стейкхолдерами, стійкості й резильєнтності, ESG, адаптивної алокації ризиків, BIM, сценарного та нейромережевого моделювання використано під час оновлення змісту навчальних дисциплін «Фінансово-економічна безпека» та «Економічний аналіз», підготовки навчально-методичних матеріалів, практичних завдань і кваліфікаційних робіт (довідка № 14/26 від 14.04.2026 р.). Інтеграція авторського інструментарію в освітню підготовку сприяє формуванню компетентностей з інтегрованого оцінювання підприємств-стейкхолдерів, цифрової координації будівельних проєктів, інтерпретації екологічних і соціальних обмежень, сценарного аналізу, управління даними та обґрунтування рішень у проєктах біосферосумісного будівництва.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, концептуально-онтологічні та методологічні розробки, моделі, механізми, методичний інструментарій, аналітичні результати і практичні рекомендації, представлені в дослідженні, одержано здобувачем особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, використано лише ті положення, результати та висновки, що належать здобувачеві; зміст його особистого внеску конкретизовано у переліку публікацій за темою дослідження. Матеріали та наукові результати кандидатської дисертації під час підготовки цієї роботи не використовувалися.

Апробація змісту результатів та інновацій дослідження здійснена на 9 міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях, зазначених у списку [29-38].

Публікації. Основні науково-теоретичні, методичні та практичні результати дисертації опубліковано у 39 друкованих працях, з яких: 2 монографії (1 одноосібна, 1 у співавторстві); 3 наукові статті у виданнях, що індексуються у наукометричних базах Scopus та Web of Science Core Collection (з них 1 наукова стаття у виданні, віднесеному до першого квартиля (Q1), 1 публікація у виданнях, віднесених до третього квартиля (Q3); 23 статті у спеціалізованих наукових виданнях та збірниках наукових праць, включених до категорії «Б» переліку фахових видань; 10 публікацій апробаційного характеру у вигляді тез доповідей на міжнародних та вітчизняних науково-практичних конференціях та 1 наукова публікація, яка додатково відображає результати дисертаційної роботи.

Структура та обсяг дисертаційної роботи відповідають чинним нормативним вимогам і узгоджуються з характером та змістом поставлених у ній наукових завдань. У роботі представлено анотації українською та англійською мовами, список наукових праць здобувача, вступ, п'ять розділів основної частини, узагальнені висновки, бібліографічний список із 334 позицій, а також додатки. Обсяг основного тексту дисертації становить 453 сторінки, що містить 102 ілюстрації та 84 таблиці.

РОЗДІЛ 1

КОНЦЕПТУАЛЬНО-ОНТОЛОГІЧНА ПЛАТФОРМА ФОРМУВАННЯ ЕКОНОМІКО-ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВАМИ-СТЕЙКХОЛДЕРАМИ ПРОЄКТІВ БІОСФЕРОСУМІСНОГО БУДІВНИЦТВА

1.1. Парадигмізація управління підприємствами-стейкхолдерами: від індустріально-ресурсних до цифрових, екосистемних і біосферосумісних моделей

Сучасний етап розвитку будівельної сфери характеризується поглибленням цифрових перетворень, посиленням екологічних вимог, ускладненням інвестиційно-будівельних проєктів і розширенням складу їх учасників. За таких умов результативність підприємства залежить не тільки від раціонального використання матеріальних, трудових і фінансових ресурсів, а й від здатності працювати у спільному інформаційному середовищі, узгоджувати інтереси учасників, управляти ризиками та враховувати наслідки рішень упродовж життєвого циклу об'єкта.

Підприємство-стейкхолдер проєкту біосферосумісного будівництва доцільно розглядати як відкриту багаторівневу економічну систему, що виконує визначену роль у формуванні проєктної цінності, залучає та перетворює ресурси, створює і використовує цифрові дані, несе відповідальність за результати власної діяльності та взаємодіє з іншими учасниками на договірних, організаційних та інформаційних засадах. Результат його діяльності має подвійну природу: матеріалізується у будівельному об'єкті та водночас виявляється в економічних, екологічних, соціальних й інституційних наслідках, що зберігаються після завершення будівельних робіт.

Трансформація умов функціонування будівельних підприємств зумовила послідовне розширення управлінської парадигми. Цей процес має

кумулятивний характер: кожна наступна модель не заперечує попередню, а переозначає її функції у ширшому предметному полі. Індустріально-ресурсна дисципліна вбудовується у проєктно-процесну координацію, процесна логіка доповнюється цифровою інтеграцією, а цифрові можливості підпорядковуються екосистемному узгодженню та біосферосумісним обмеженням [1–35, 270].

Індустріально-ресурсний підхід сформував фундамент управління будівельними підприємствами у період домінування масового виробництва, механізації, централізованого планування та ієрархічної координації. Його управлінська раціональність була пов'язана з нормуванням праці, дисципліною виконання, розподілом функцій, кошторисним контролем і максимізацією виробничої продуктивності. Ці принципи мають витоки у працях Ф. Тейлора та А. Файоля, де підприємство описувалося через керованість операцій, регламентацію функцій і вертикальну відповідальність [1–2]. Для будівництва цей підхід був практично значущим, оскільки забезпечував контроль за матеріалами, робочою силою, технікою та строками виконання робіт у великих виробничих системах.

Однак обмеження індустріально-ресурсної моделі проявилися тоді, коли будівельні проєкти стали більш складними за технологіями, фінансуванням, правовими режимами, екологічними наслідками та кількістю учасників. Вертикальне адміністрування виявилось недостатнім для координації проєктних мереж, де результат залежить не тільки від внутрішньої продуктивності підприємства, а й від якості взаємодії із замовниками, проєктувальниками, субпідрядниками, постачальниками, інвесторами, органами влади та громадами. У цій точці відбулася перша суттєва зміна парадигми: управління будівельним підприємством почало розглядатися через проєктну, процесну та стейкхолдерську логіку.

Розвиток стратегічного менеджменту і теорії стейкхолдерів змінив розуміння меж підприємства. Якщо класична модель концентрувалася на внутрішній ефективності, то стейкхолдерський підхід показав, що економічна

результативність залежить від здатності узгоджувати інтереси груп, які впливають на організацію або зазнають впливу її діяльності [3]. Модель салієнтності стейкхолдерів, запропонована Р. Мітчеллом, Б. Ейглом і Д. Вудом, дала змогу ранжувати зацікавлені сторони за владою, легітимністю та терміновістю вимог [4], а мережева логіка Т. Роулі розширила аналіз від окремих двосторонніх зв'язків до конфігурації взаємного впливу в мережі [5]. Для будівництва це означало перехід від управління договором до управління системою взаємозалежностей.

Другий змістовний зсув пов'язаний із поширенням процесного підходу та концепції ощадливого будівництва у будівельному менеджменті. Л. Коскела запропонував розглядати будівельне виробництво не тільки як перетворення ресурсів на продукт, а як потік і створення цінності для замовника [6]. Г. Баллард розвинув цю логіку через систему останнього планувальника, яка змістила акцент із формального планування на надійність виробничих зобов'язань, узгодження коротких циклів робіт і зменшення втрат [7]. Для будівельного підприємства це мало принципове значення: ефективність почала вимірюватися не лише фактом виконання кошторису, а й стабільністю потоків робіт, передбачуваністю операцій, зниженням обсягів повторного виконання та якістю координації команд.

Третій етап еволюції визначається цифровізацією. Впровадження BIM, спільних середовищ даних, цифрових платформ, систем планування ресурсів підприємства, засобів автоматизованого календарно-ресурсного планування та аналітики даних змінило природу управлінського об'єкта. Будівельний об'єкт став представлений не лише фізичною конструкцією, а й інформаційною моделлю, що об'єднує геометричні, технічні, економічні, часові, ресурсні та експлуатаційні дані. У фундаментальній праці з інформаційного моделювання BIM визначено основою координації, управління змінами, зменшення колізій і підвищення прозорості протягом життєвого циклу об'єкта [8]. Б. Суккар доводить, що BIM не зводиться до

програмного продукту, а охоплює технологічні, процесні та інституційні домени, рівні зрілості й ролі учасників [9].

Нормативним підтвердженням цього зсуву стала серія ISO 19650, яка закріплює принципи управління інформацією із застосуванням BIM, зокрема організацію, обмін, версіонування та зберігання даних між учасниками проєкту [10]. Розвиток BIM-технологій розширює можливості інтеграції інформації про будівельний об'єкт упродовж його життєвого циклу та формує передумови для узгодженої взаємодії учасників на основі єдиної інформаційної моделі [11]. Для підприємств-стейкхолдерів це означає перехід від управління документами до управління даними, від реактивного контролю до прогнозування, від локальних файлів до спільного інформаційного середовища, від ізольованих функцій до наскрізних процесів.

Зміна цифрової основи не усуває економічну природу управління, а посилює вимоги до простежуваного зв'язку між даними, рішеннями та результатами. У сучасних дослідженнях цифрова трансформація розглядається як комплексна перебудова бізнес-моделі, процесів, організаційних спроможностей і механізмів створення цінності [12]. Онтологічний підхід доповнює цю позицію поданням цифрової трансформації як системи знань і взаємозв'язків між технологічними, організаційними, інформаційними та соціальними компонентами [13]. Відтак економіко-цифрова модель управління підприємством-стейкхолдером має трактуватися не як сукупність програмних засобів, а як цілісна архітектоніка перетворення даних на економічно обґрунтовані управлінські рішення.

Четвертий етап визначається екологічними та кліматичними обмеженнями. Будівництво характеризується значним матеріальним, енергетичним і вуглецевим слідом. За даними Програми ООН з навколишнього середовища та Глобального альянсу з питань будівель і будівництва, сектор залишається одним із провідних споживачів енергії, матеріалів і джерел викидів вуглецю [14]. Тому традиційне оцінювання, зосереджене переважно на вартості та строках, є методологічно неповним. До

системи управління мають бути включені показники життєвого циклу, енергоефективності, вбудованого вуглецю, повторного використання матеріалів, екологічної безпеки та впливу на якість середовища життєдіяльності.

Європейська рамка оцінювання сталості будівель закріплює життєвоцикловий підхід через показники вуглецю, матеріалів, води, здоров'я, комфорту та кліматичних впливів [15]. Таксономія ЄС формує спільні критерії визначення екологічно сталих видів економічної діяльності та спрямування інвестицій у проекти, сумісні з цілями кліматичної політики [16]. Директива ЄС щодо корпоративної звітності зі сталого розвитку переводить відомості про екологічні, соціальні й управлінські результати у площину обов'язкового розкриття для компаній та ланцюгів створення вартості [17]. За цих обставин доступ до капіталу, участь у міжнародних проектах і репутаційна легітимність підприємства дедалі більше залежать від його спроможності підтверджувати сталість управлінських рішень достовірними даними.

Український контекст посилює ці вимоги через завдання післявоєнного відновлення, потребу в прозорому використанні інвестиційних ресурсів, інтеграцію до європейського ринку та поступову гармонізацію нормативної бази. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.02.2021 № 152-р схвалило Концепцію впровадження BIM-технологій в Україні, визначивши їх як інструмент реформування, модернізації та цифрової трансформації будівельної галузі [18]. У національних дослідженнях підкреслюються бар'єри цифровізації: вартість, дефіцит компетенцій, фрагментарність стандартів, неготовність організаційної культури, сумісність програмних комплексів, контрактні умови та слабкість інституційної підтримки [19–20]. Водночас методичні підходи до оцінки цифровізації будівельних підприємств доводять, що BIM може бути основою не окремої операційної модернізації, а повної цифровізації процесів і бізнес-моделі протягом життєвого циклу об'єкта [21].

Еволюція управління будівельними підприємствами не є лінійною заміною однієї концепції іншою. Вона має кумулятивний характер:

індустріальна дисципліна ресурсів зберігається, але вбудовується у процесну керованість; процесна логіка доповнюється цифровими даними; цифровізація набуває сенсу тільки через економічний результат; економічний результат отримує обмеження через ESG, LCA, соціальну легітимність і вимоги стейкхолдерів. Відповідно, нова парадигма не може бути описана лише як «цифрова» або лише як «зелена». Вона є економіко-цифровою, стейкхолдерсько орієнтованою та біосферосумісною одночасно.

Таблиця 1.1 систематизує внесок основних наукових підходів у формування сучасної управлінської парадигми підприємств-стейкхолдерів. Окремі напрями не дають повної відповіді на проблему управління в умовах цифрово-екологічної трансформації. Класичний менеджмент пояснює дисципліну ресурсів, проєктне управління – координацію тимчасових систем, ощадливе будівництво – керованість потоків, BIM – інформаційну цілісність, стейкхолдерська теорія – легітимність і баланс інтересів, ESG та біосферосумісність – нормативно-ціннісні межі економічного зростання.

Таблиця 1.1

Наукові підходи, що формують сучасну парадигму управління підприємствами-стейкхолдерами

Науковий підхід	Зміст	Обмеження для сучасного будівництва	Значення для формування нової парадигми
1	2	3	4
Класичний і адміністративний менеджмент	Нормування операцій, поділ праці, ієрархія, контроль ресурсів, управлінська дисципліна	Недостатньо враховує мережевість проєктів, складність стейкхолдерів і екологічні наслідки.	Формує базовий контур виробничої керованості, без якого цифрові та ESG-інструменти не дають стійкого ефекту.
Стратегічний та стейкхолдерський менеджмент	Підприємство розглядається як система відносин із групами впливу; важливими стають легітимність і баланс інтересів	Потребує операціоналізації через метрики, дані, контракти та процедури взаємодії.	Пояснює перехід від управління підприємством як закритою системою до управління екосистемою проєкту.
Ощадливе будівництво і процесний підхід	Будівництво подається як потік створення цінності; центральними стають усунення втрат, надійність планування, короткі цикли контролю	Без цифрових даних важко забезпечити масштабованість і прозорий план-факт аналіз.	Створює операційний механізм підвищення продуктивності, сумісний із BIM та цифровим контролінгом.

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4
BIM, відкрита BIM-взаємодія і цифрове управління інформацією	Об'єкт і процеси подаються як структурована інформаційна модель; дані стають основою координації, аналізу і прийняття рішень	Впровадження може залишитися фрагментарним без зміни процесів, ролей і контрактів.	Формує цифрову інфраструктуру економіко-цифрової моделі управління.
Сталий розвиток, ESG, LCA, циркулярність	Економічна результативність поєднується з екологічними, соціальними та управлінськими критеріями; оцінюється життєвий цикл активу	Потребує надійних даних, стандартизованої звітності та інституційної дисципліни.	Задає біосферні межі управлінських рішень і перетворює сталість на економічну умову доступу до ринків та капіталу.

Джерело: узагальнено автором на основі [1-8, 11, 14-17, 22-26].

Порівняння засвідчує, що сучасна управлінська парадигма формується не одним теоретичним напрямом, а їх взаємодоповнювальною інтеграцією, у якій виробнича керованість поєднується з цифровою доказовістю, стейкхолдерською легітимністю та життєвоцикловою відповідальністю.

Логіку кумулятивного розширення предмета управління, механізмів координації та критеріїв результативності відображено на рис. 1.1.

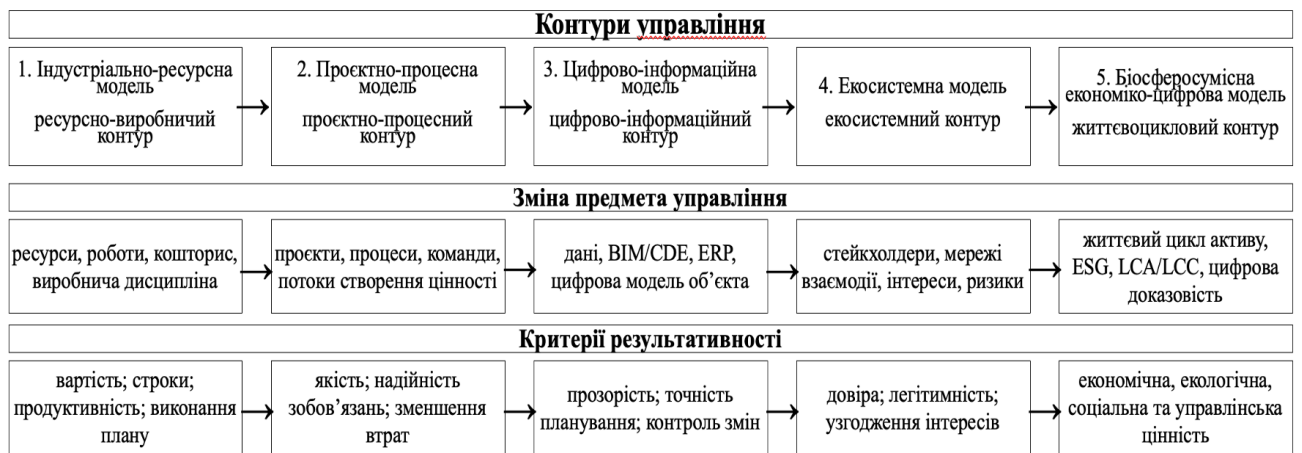


Рис. 1.1. Кумулятивна еволюція парадигми управління будівельними підприємствами

Джерело: розроблено автором.

Візуалізована послідовність фіксує зміну управлінського фокусу від ресурсів і робіт до даних, екосистемних взаємозалежностей та життєвоциклової цінності, підтверджуючи кумулятивність запропонованої періодизації.

У зв'язку з вищевикладеним доцільно виокремити п'ять взаємопов'язаних етапів еволюції управління будівельними підприємствами. Перший етап – індустріально-ресурсний – відповідає логіці ресурсного забезпечення і виробничої дисципліни. Другий – проєктно-процесний – формується під впливом проєктного менеджменту, загальне управління якістю та ощадливе будівництво. Третій – цифрово-інтеграційний – пов'язаний з BIM, спільними середовищами даних, відкритий BIM-обмін і платформною координацією. Четвертий – стейкхолдерсько-екосистемний – відображає перехід від двосторонньої взаємодії замовника та підрядника до мережевого управління інтересами, ризиками і цінністю. П'ятий – біосферосумісний економіко-цифровий – виникає на перетині цифрових даних, ESG-вимірності, LCA, циркулярності та довгострокової відповідальності за життєвий цикл активу.

Така періодизація не претендує на механічне датування, оскільки різні підприємства й ринки можуть одночасно перебувати на різних рівнях зрілості. Її значення полягає в іншому: вона дає змогу показати логіку зміни управлінського предмета. На ранніх етапах підприємство управляло переважно ресурсами і роботами; з розвитком проєктного підходу – процесами та командами; із цифровізацією – даними та моделями; у стейкхолдерській парадигмі – відносинами та очікуваннями; у біосферосумісній парадигмі – інтегрованою цінністю, яка охоплює економічні, соціальні, екологічні й управлінські результати.

Кумулятивну послідовність розвитку управлінських парадигм, їх інструменти, критерії результативності та методологічні обмеження узагальнено в табл. 1.2.

Періодизація підтверджує кумулятивний характер парадигмізації: кожний наступний етап розширює предмет управління, не усуваючи ресурсної, процесної та проєктної основ попередніх моделей.

Для індустріально-ресурсної парадигми будівельне підприємство постає переважно як виробнича одиниця, що мобілізує ресурси для виконання робіт.

Таблиця 1.2

Періодизація еволюції парадигм управління підприємствами-стейкхолдерами

Етап	Домінантна управлінська логіка	Основні інструменти	Критерії результативності	Обмеження
Індустріально-ресурсний	Контроль ресурсів, нормування праці, централізоване планування, виробнича дисципліна.	Кошториси, календарні графіки, норми, функціональна ієрархія.	Виконання обсягів, дотримання бюджету, продуктивність праці.	Недостатня гнучкість у складних мережевих проєктах.
Проектно-процесний	Координація тимчасових проєктних систем і потоків створення цінності.	PMBOK-підходи, загальне управління якістю, ощадливе будівництво, система останнього планування, план-факт контроль.	Строки, якість, зменшення втрат, надійність виробничих зобов'язань.	Обмежена прозорість без наскрізних даних.
Цифрово-інтеграційний	Управління інформаційною моделлю об'єкта, процесами і даними життєвого циклу.	BIM, спільне середовище даних, ERP, відкрита BIM-взаємодія, цифрові двійники, аналітика даних.	Скорочення колізій, прозорість, точність планування, швидкість ухвалення рішень.	Ризик фрагментарної IT-інструменталізації.
Стейкхолдерсько-екосистемний	Узгодження інтересів і взаємозалежностей у мережі учасників проєкту.	картування стейкхолдерів, інтегроване виконання проєкту, платформи співпраці, спільне управління ризиками.	Легітимність, довіра, зниження конфліктів, спільне створення цінності.	Складність вимірювання внеску кожного учасника.
Біосферосумісний економіко-цифровий	Підпорядкування економічних рішень даним, ESG-метрикам, життєвому циклу та біосферним межах.	LCA, LCC, європейська рамка оцінювання сталості будівель, вуглецеві бюджети, простори даних, ESG-звітність, аналітика із застосуванням ШІ ризиків.	Економічна ефективність разом із кліматичною, ресурсною, соціальною та управлінською результативністю.	Потреба у високій цифровій зрілості та інституційній узгодженості.

Джерело: узагальнено автором на основі [1–35].

Для нової парадигми воно є відкритою екосистемною системою, яка взаємодіє з ринком капіталу, державними регуляторами, громадами, власниками активів, майбутніми користувачами, технологічними провайдерами, професійними мережами, постачальниками матеріалів і логістичними партнерами. Відповідно, результат управління визначається не лише внутрішньою ефективністю, а й якістю зовнішніх зв'язків, здатністю

підприємства працювати в правилах прозорості, довіри, даних і довгострокової відповідальності.

У цьому контексті будівельне підприємство має щонайменше три рівні управлінської взаємодії. Перший рівень – внутрішньоорганізаційний: структура, процеси, ресурси, компетенції, цифрова зрілість, система контролінгу. Другий рівень – проєктно-мережевий: замовники, підрядники, субпідрядники, проєктувальники, постачальники, експлуатуючі організації. Третій рівень – інституційно-біосферний: державні норми, міська політика, громади, екологічні стандарти, ESG-звітність, вимоги до декарбонізації та циркулярності. Нова парадигма виникає тоді, коли ці рівні не існують окремо, а координуються через спільні дані, критерії результативності та правила прийняття рішень.

Управлінська проблема полягає не тільки у виборі технологій, а у здатності підприємства змінити власну архітектуру управління. Фрагментарне впровадження BIM або аналітики не перетворює підприємство на економіко-цифрову систему, якщо не змінюються ролі, регламенти, відповідальність за дані, контрактні умови, механізми план-факт контролю та критерії оцінювання. Саме це підкреслюють дослідження українських будівельних і проєктних підприємств: серед бар'єрів цифрової трансформації фіксуються не лише фінансові та технічні обмеження, а й корпоративна культура, структура управління, контрактні умови, навички персоналу та сумісність програмного забезпечення [19–20].

На рівні національної економіки це має прикладне значення для повоєнного відновлення України. Відбудова не може спиратися лише на нарощування будівельних потужностей. Вона потребує прозорих процедур, цифрової простежуваності ресурсів, екологічно обґрунтованих рішень, відкритості даних для інвесторів і донорів, життєвоциклового планування вартості та ризиків. Отже, перехід до біосферосумісної стейкхолдерсько орієнтованої моделі має не декларативний, а економічний зміст: він зменшує транзакційні витрати, підвищує довіру, забезпечує доступ до фінансування,

знижує ризики помилок і створює підстави для інтеграції до європейського ринку будівельних послуг.

Структурні відмінності між індустріально-ресурсною, цифрово-стейкхолдерською та біосферосумісною економіко-цифровою моделями наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Порівняльна характеристика індустріально-ресурсної, цифрово-стейкхолдерської та біосферосумісної моделей управління

Параметр порівняння	Індустріально-ресурсна модель	Цифрово-стейкхолдерська модель	Біосферосумісна економіко-цифрова модель
Об'єкт управління	Роботи, ресурси, виробничі потужності, кошторис.	Проект, інформаційна модель, процеси, дані, учасники.	Життєвий цикл активу, портфель даних, стейкхолдерська цінність, екологічні межі.
Головна мета	Виконати обсяг робіт у межах бюджету і строків.	Підвищити координацію, прозорість і керованість проекту.	Забезпечити економічну результативність за умов кліматичної, ресурсної, соціальної та управлінської відповідальності.
Тип координації	Вертикальна ієрархія, контроль виконання.	Платформна співпраця, спільне середовище даних, проектна інтеграція.	Екосистемна оркестрація інтересів, ризиків, даних і цілей сталості.
Роль технологій	Допоміжний інструмент механізації та обліку.	Основа інтеграції даних, ВІМ і спільне середовище даних, цифровий контроль.	Інфраструктура доказовості ESG-рішень, LCA та LCC, вуглецевого бюджету та життєвоциклового управління.
Критерії ефективності	Вартість, строки, продуктивність, виконання плану.	План-факт точність, зменшення колізій, швидкість обміну інформацією, керованість ризиків.	Економічна додана вартість, вуглецева та ресурсна ефективність, соціальна прийнятність, прозорість управління.
Тип ризиків	Виробничі, кошторисні, трудові, ресурсні.	Інформаційні, інтеграційні, кібернетичні, контрактні, компетентнісні.	Кліматичні, ESG, репутаційні, екосистемні, регуляторні, дані життєвого циклу.

Джерело: узагальнено автором на основі [1–35].

Зіставлення моделей доводить, що перехід до біосферосумісного економіко-цифрового управління змінює не лише набір інструментів, а об'єкт,

горизонт, критерії результативності та спосіб координації підприємств-учасників.

Категорія біосферосумісності потребує окремого теоретичного уточнення. Її не можна ототожнювати лише з екологічністю окремого матеріалу або наявністю сертифіката зеленого будівництва. У межах дослідження біосферосумісність визначено як здатність підприємств і проєктної екосистеми створювати економічну та суспільну цінність без порушення природних, соціальних і просторово-інфраструктурних умов відтворення території. Таке трактування поєднує ресурсну достатність, екологічну рівновагу, безпеку середовища життєдіяльності та довгострокову адаптивність будівельного активу [32–34].

Для будівельного підприємства біосферосумісність має управлінський, а не лише етичний зміст. Вона вимагає включення природних і соціальних обмежень у ранні фази прийняття рішень: вибір ділянки, концепції проєкту, матеріалів, технологій, логістики, експлуатаційної моделі, демонтажу та повторного використання ресурсів. Саме тут цифрові інструменти набувають прикладної цінності: BIM і спільне середовище даних забезпечують структурованість даних, LCA дає можливість оцінити вплив життєвого циклу, LCC – повну вартість володіння, цифровий двійник – моніторинг фактичних параметрів експлуатації, а аналітика даних – прогнозування ризиків і сценаріїв.

Біосферосумісна парадигма змінює економічну логіку будівельного підприємства. У ресурсній моделі економія часто досягалася через мінімізацію прямих витрат. У біосферосумісній моделі визначальним стає зменшення повної вартості життєвого циклу, втрат від неякісної координації, вуглецевих та регуляторних ризиків, витрат на експлуатацію, ремонт і демонтаж. Таке зміщення не скасовує прибутковість, а поглиблює її розуміння: економічний результат оцінюється у часовому горизонті, де враховано не тільки інвестиційну фазу, а й експлуатацію, адаптивність, ресурсне відновлення та ринкову ліквідність активу.

Стейкхолдерський вимір біосферосумісності полягає у тому, що якість будівельного рішення перевіряється не лише власником або підрядником, а ширшою системою учасників. Інвестор оцінює ризик і дохідність, громада – вплив на середовище, регулятор – відповідність нормам, користувач – безпеку й комфорт, постачальник – можливість підтвердження походження матеріалів, експлуатуюча організація – довгострокові витрати. Без цифрової прозорості ці оцінки залишаються фрагментарними. Тому біосферосумісна модель потребує не загальних намірів, а доказового управління даними.

Перехід від індустріально-ресурсної до біосферосумісної стейкхолдерсько орієнтованої парадигми створює методологічну основу формування економіко-цифрових моделей управління. Змінюється одиниця аналізу: досліджується не окрема технологія або окремих проєкт, а взаємодія підприємства, цифрової інфраструктури, стейкхолдерської екосистеми та життєвого циклу активу [174]. Розширюється система критеріїв: до економічних показників додаються цифрова зрілість, якість даних, екологічна результативність, соціальна прийнятність, інституційна відповідність і ризикостійкість. Управлінське рішення має бути раціональним щодо витрат і строків, доказовим щодо даних, узгодженим із підприємствами-учасниками та сумісним із вимогами сталого розвитку.

Така постановка дає змогу сформулювати авторське розуміння біосферосумісної стейкхолдерсько орієнтованої економіко-цифрової моделі управління будівельним підприємством. Запропонована модель становить інтегровану систему принципів, цифрових даних, управлінських процедур, інституційних правил, стейкхолдерських механізмів і показників результативності, за допомогою якої підприємство планує, координує, контролює та коригує створення будівельної цінності протягом життєвого циклу активу з урахуванням економічної ефективності, екологічних меж, соціальної легітимності та вимог до прозорості управління.

У цьому визначенні принциповими є п'ять ознак. Перша – інтеграційність: модель об'єднує економічні, цифрові, екологічні, соціальні та

управлінські параметри. Друга – даноцентричність: управління спирається на структуровані, оновлювані та перевірені дані. Третя – життєвоцикловість: рішення оцінюється не лише в інвестиційній фазі, а й у проєктуванні, будівництві, експлуатації, реконструкції та демонтажі. Четверта – екосистемність: підприємство координує не тільки внутрішні ресурси, а й взаємодію багатьох учасників. П'ята – біосферна обмеженість: економічне зростання не розглядається окремо від природних і соціальних умов відтворення території.

Прикладний висновок для українських будівельних підприємств полягає у тому, що цифрова трансформація має бути пов'язана з управлінською трансформацією. Першочерговими діями є створення спільного середовища даних, закріплення відповідальності за інформацію, стандартизація BIM-процесів, інтеграція план-факт контролю з моделлю об'єкта, формування ESG-та LCA-показників для проєктів, оновлення контрактних умов у бік раннього залучення основних учасників, розвиток компетенцій персоналу та перехід до цифрового контролінгу життєвого циклу. Без цих змін цифрові технології залишаються локальним інструментом, а не основою нової парадигми управління.

Науково-прикладні суперечності, які визначають необхідність переходу до нової управлінської парадигми, систематизовано в табл. 1.4.

Виявлені суперечності визначають напрями подальшого методологічного розв'язання: інтеграцію LCA і LCC, розвиток цифрової зрілості, узгодження інтересів, життєвоциклове планування та доказове ESG-управління.

Отже, проведений аналіз дає підстави стверджувати, що еволюція парадигми управління будівельними підприємствами від індустріально-ресурсної до біосферосумісної та стейкхолдерсько орієнтованої моделі має закономірний і кумулятивний характер. Кожний етап розвитку не усуває попередній, а переводить його в ширший контур управління: ресурсна дисципліна доповнюється процесною керованістю, процесна керованість –

цифровими даними, цифрові дані – стейкхолдерською координацією, а стейкхолдерська координація – біосферними обмеженнями та ESG-вимірністю.

Встановлено, що індустріально-ресурсна парадигма забезпечила базові принципи нормування, ієрархії та контролю, проте її методологічні межі проявляються в умовах складних проєктних мереж, цифровізації, кліматичної політики та зростання вимог до прозорості. Проєктно-процесна логіка та принципи ощадливого будівництва розширили управлінський фокус до потоків створення цінності, але без цифрової інфраструктури їхній потенціал залишається обмеженим. BIM, відкритий BIM-обмін, спільне середовище даних та цифрові двійники створюють інформаційну основу для нової моделі, однак потребують інтеграції з економічними, інституційними, ESG- та стейкхолдерськими механізмами.

Таблиця 1.4

Науково-прикладні суперечності переходу до нової парадигми управління

Суперечність	Прояв у діяльності будівельного підприємства	Напрямок наукового розв'язання в межах дослідження
Між ресурсною ефективністю та життєвоцикловою цінністю	Мінімізація капітальних витрат може збільшувати експлуатаційні, екологічні та соціальні витрати.	Поєднання кошторисного, LCC та LCA-підходів у системі економіко-цифрового контролінгу.
Між цифровими інструментами та управлінською зрілістю	BIM або ERP використовуються локально, без зміни процесів, ролей і відповідальності за дані.	Розроблення моделі цифрової зрілості управління та дорожньої карти переходу до інтегрованих контурів даних.
Між інтересами окремих учасників і цінністю екосистеми	Підрядник, інвестор, громада, регулятор і користувач мають різні горизонти оцінки результату.	Формування стейкхолдерсько-екосистемного механізму узгодження критеріїв, ризиків і вигод.
Між коротким горизонтом проєкту та довгим горизонтом активу	Рішення, вигідні на етапі будівництва, можуть бути неефективними на етапі експлуатації або реконструкції.	Перехід до життєвоциклового управління на основі цифрового паспорта, BIM і спільне середовище даних та показників експлуатаційної ефективності.
Між декларативною сталістю та доказовим ESG-управлінням	Екологічні й соціальні заяви не завжди підтверджуються даними, методиками і процедурами аудиту.	Інтеграція ESG, європейська рамка оцінювання сталості будівель, LCA та цифрових даних у систему управлінського обліку й звітності.

Джерело: узагальнено автором на основі [1–35].

Обґрунтовано, що біосферосумісна стейкхолдерсько орієнтована економіко-цифрова модель управління будівельним підприємством є наступним етапом управлінської еволюції. Її відмінність полягає у поєднанні економічної результативності, цифрової доказовості, життєвоциклового підходу, стейкхолдерської легітимності та екологічних меж. Вона переводить сталість із рівня декларації у площину управлінського розрахунку, даних, регламентів, контрактів, показників і відповідальності [161].

Науковий результат підрозділу полягає в уточненні змісту управлінської парадигми будівельного підприємства, систематизації етапів її еволюції, розмежуванні індустріально-ресурсної, цифрово-стейкхолдерської та біосферосумісної моделей, а також у формулюванні авторського трактування біосферосумісної стейкхолдерсько орієнтованої економіко-цифрової моделі управління. Прикладне значення одержаних положень полягає у можливості їх подальшого використання для побудови методології імплементації економіко-цифрових моделей, формування критеріїв оцінювання їх ефективності та розроблення дорожньої карти цифрово-екологічної трансформації будівельних підприємств України.

1.2. Онтологічна архітектоніка економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами проєктних екосистем

Цифрова трансформація будівельної галузі не зводиться до заміни паперових документів електронними файлами або придбання окремих програмних продуктів. Її зміст полягає у зміні способу представлення будівельного об'єкта, організації процесів, розподілу відповідальності, формування вартості та використання даних упродовж життєвого циклу. У межах дослідження онтологічні засади цієї трансформації конкретизовано через узгодження фізичних і цифрових активів, процесів, учасників, ресурсів, правил та інтегрованих показників у єдиній системі економіко-цифрового управління.

Потреба в онтологічному обґрунтуванні зумовлена фрагментованістю будівництва. У межах одного проєкту діють замовники, девелопери, проєктувальники, генеральні підрядники, спеціалізовані виконавці, постачальники, експлуатаційні організації, фінансові установи, регулятори та громади. Кожен учасник формує власні масиви даних, застосовує відмінні класифікатори, програмні середовища, процедури документообігу й показники результативності. Відсутність спільної мови опису об'єктів, процесів і відповідальності спричиняє втрати інформації, дублювання операцій, конфлікти версій і послаблення простежуваності рішень. Саме тому цифрова трансформація потребує онтологічної архітектури, яка встановлює склад сутностей, їхні атрибути, взаємозв'язки, правила оновлення даних і відповідальність за їх достовірність.

Онтологія економіко-цифрового управління трактується як формалізоване представлення предметної області, що визначає релевантні об'єкти, їхні властивості, типи зв'язків, суб'єктів створення й використання даних, правила доступу та економічні наслідки управлінських рішень. Такий підхід забезпечує семантичну узгодженість фізичних активів, цифрових моделей, процесів, ресурсів, ролей та інтегрованих показників, а також формує основу переходу від локальної автоматизації до життєвоциклового управління [13].

Методологічне обґрунтування онтологічної архітектури спирається на категоріальний аналіз, системно-структурну декомпозицію, порівняння цифрових концепцій та інституційний аналіз стандартів. Категоріальний аналіз розмежовує цифрову трансформацію, BIM, цифровий двійник, простір даних та економіко-цифрову модель. Системно-структурна декомпозиція встановлює рівні архітектури: об'єкти, процеси, дані, ролі, регламенти й показники. Порівняльний аналіз розкриває внесок Індустрії 4.0, BIM, цифрових двійників і просторів даних у формування єдиної управлінської логіки. Інституційний аналіз забезпечує врахування міжнародних стандартів

управління інформацією, відкритих форматів обміну та правил суверенного використання даних.

Світовий науковий дискурс щодо цифрової трансформації будівництва розвивається від аналізу окремих технологій до формування цілісних інформаційно-управлінських архітектур. Класичні праці з BIM заклали розуміння інформаційної моделі як системи даних про об'єкт, що підтримує координацію учасників, управління змінами і контроль життєвого циклу [8]. Фреймворк BIM-зрілості Б. Суккар розширив цей підхід, запропонувавши розглядати BIM як сукупність технологічних, процесних і політичних доменів, пов'язаних із ролями стейкхолдерів та етапами впровадження [9]. Стандарт ISO 19650 інституціоналізував BIM як управління інформацією, де важливими є не лише моделі, а й правила обміну, запису, версіонування, організації та відповідальності всіх учасників інформаційного процесу [10].

Концепція Індустрія 4.0 змінила рамку технологічної модернізації підприємств, акцентувавши на кіберфізичних системах, інтернеті речей, хмарних обчисленнях, великих даних, автономізації та горизонтально-вертикальній інтеграції операційних процесів [36–37]. У будівництві ці ідеї трансформувалися в Будівництво 4.0, де технологічна логіка промислового виробництва адаптується до проектної унікальності, тимчасових виробничих майданчиків, високої ролі субпідрядних мереж і складності життєвого циклу об'єкта [28; 38]. Тому перенесення Індустрія 4.0 у будівництво не може бути механічним: цифровізація має враховувати несерійність будівельної продукції, локальність виконання робіт, нормативну насиченість та багатосторонню відповідальність.

Подальший розвиток цифрової трансформації пов'язаний із цифровими двійниками. Якщо BIM забезпечує структурований цифровий опис об'єкта, то цифровий двійник додає динамічний стан, дані сенсорів, часову змінність, сценарне моделювання і зворотний зв'язок між фізичним активом та його цифровою репрезентацією [39–41]. У сфері побудованого середовища це означає перехід від «моделі для проектування» до «моделі для управління

поведінкою активу», що має економічні наслідки для експлуатаційних витрат, ризиків простою, енергоефективності та прогнозного обслуговування.

Окремий напрям становлять семантичні технології та простори даних. Пов'язані будівельні дані й онтологія топології будівель засвідчують, що BIM-зрілість вищого рівня потребує не тільки файлів IFC, а й машиночитаних семантичних зв'язків між просторами, елементами, системами, сенсорами, матеріалами, характеристиками та подіями [42–43]. Семантична узгодженість цифрового середовища потребує структуризації метаданих, які забезпечують формалізований опис інформаційних об'єктів, їхніх характеристик і взаємозв'язків у багатовимірних інформаційних системах [44]. Інтеграція потоків даних упродовж життєвого циклу будівельного проєкту формує інформаційну основу цифрового підприємства та забезпечує взаємозв'язок між проєктуванням, будівництвом, експлуатацією й управлінськими процедурами [45–48].

Український науковий і нормативний контекст загалом узгоджується з цією траєкторією, але має власні обмеження. Концепція впровадження BIM-технологій в Україні закріплює потребу переходу до інформаційного моделювання як інструменту управління інформацією під час проєктування, будівництва та експлуатації [18]. Дослідження Д. Дубініна систематизує бар'єри цифрової трансформації українських будівельних і проєктних підприємств: вартість, законодавчі обмеження, дефіцит експертів, сумісність програмного забезпечення, обізнаність, корпоративна культура, бізнес-процеси, структура управління, навички персоналу, потреба в навчанні, умови контрактів і стандарти [19]. Д. Бондаренко доводить, що BIM може виступати комплексною технологією цифровізації будівельного підприємства від операцій до бізнес-моделі та потребує методичного оцінювання рівня цифровізації [21]. А. Чумаченко підкреслює значення BIM для повоєнного відновлення України, прозорості взаємодії та підвищення якості управлінських рішень [20].

Наукові підходи, що формують онтологічне підґрунтя цифрової трансформації будівництва, зіставлено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Систематизація наукових підходів до онтологічного підґрунтя цифрової трансформації будівництва

Науковий підхід	Зміст	Онтологічне значення для будівельного підприємства	Управлінський результат
ВІМ-фреймворки	Інформаційна модель, рівні зрілості, технологічні, процесні та політичні домени	Формують класи об'єктів, властивості, ролі, інформаційні вимоги та правила оновлення даних	Єдиний інформаційний контур проєктування, будівництва й експлуатації
ISO 19650 та спільне середовище даних	Управління інформацією, обмін, запис, версіонування, відповідальність учасників	Перетворюють інформаційну модель на керований процес із визначеними статусами, власниками та процедурами	Зниження втрат інформації, контроль версій, прозора відповідальність
Індустрія 4.0 та Будівництво 4.0	Кіберфізичні системи, IoT, хмари, автоматизація, роботизація, великі дані	Вводять у модель події, сенсори, потоки даних, автоматизовані операції та зворотний зв'язок	Підвищення продуктивності, керованості та адаптивності виробничих процесів
Цифровий двійник	Динамічна цифрова репрезентація фізичного активу, пов'язана з поточними даними	Додає часовий стан, поведінку, сценарії, прогноз і зв'язок між фізичним та цифровим середовищем	Прогнозне обслуговування, управління ризиками, оптимізація експлуатації
Пов'язані будівельні дані	Семантичні зв'язки між елементами побудованого середовища, онтології, знансві графи	Забезпечують машиночитану інтерпретацію об'єктів, властивостей і відносин	Інтероперабельність даних, пошук, інтеграція ВІМ, IoT, LCA та управлінських даних
Простори даних	Федеративна інфраструктура обміну даними, довіра, суверенність, права доступу	Поширюють онтологію за межі підприємства на стейкхолдерську екосистему	Безпечний міжорганізаційний обмін, доказовість ESG та LCA, прозорість відновлення

Джерело: узагальнено автором на основі [8–13; 18–21; 28; 36–39; 42–50].

Систематизація показує послідовне розширення цифрової трансформації від інформаційного моделювання окремого об'єкта до семантично узгодженої, керованої та довіреної міжорганізаційної архітектури даних.

Онтологічне підґрунтя цифрової трансформації будівельної галузі доцільно визначати як впорядковану систему понять, об'єктів, атрибутів, зв'язків і правил, що забезпечує цілісне представлення будівельного підприємства, його проєктів, активів, процесів, стейкхолдерів, даних, ризиків і результатів у цифровому середовищі [253]. На відміну від технологічного опису, який фіксує наявність BIM, ERP, сенсорів або платформ, онтологічний опис пояснює, які саме сутності управляються, як вони пов'язані, які дані підтверджують їхній стан і які економічні рішення можуть бути прийняті на цій основі.

Управлінська цінність онтологізації полягає у переході від «даних як файлів» до «даних як керованих сутностей». Проєктна документація, кошториси, графіки, акти виконаних робіт, моделі, сертифікати матеріалів, дані датчиків, звіти щодо викидів і ризиків не повинні існувати як ізольовані масиви. Вони мають бути пов'язані з конкретними об'єктами, процесами, відповідальними особами, контрактами, етапами життєвого циклу, нормативними вимогами та показниками ефективності. Лише за такої умови цифрові технології створюють управлінську, а не тільки інформаційну цінність.

Онтологічна модель цифрової трансформації будівельного підприємства охоплює сім базових класів керованих сутностей. Перший клас – фізичний актив: земельна ділянка, будівля, споруда, конструктивний елемент, інженерна система, обладнання, матеріал. Другий – цифровий актив: BIM-модель, інформаційний контейнер, цифровий двійник, набір даних, документ, класифікатор, довідник, алгоритм. Третій – процес: проєктування, закупівлі, будівництво, контроль якості, логістика, експлуатація, ремонт, реконструкція та демонтаж. Четвертий – учасник: замовник, інвестор, проєктувальник, підрядник, постачальник, оператор, регулятор, громада та користувач. П'ятий – ресурс: фінансові, матеріальні, трудові, енергетичні, інформаційні й організаційні засоби. Шостий – правило: стандарти, контракти, права доступу, інформаційні вимоги, екологічні норми та процедури прийняття рішень.

Сьомий – інтегрований показник: формалізований вимір стану або результату, який пов’язує дані з вартістю, строком, продуктивністю, якістю, ризиком, енергоспоживанням, вуглецевим слідом, повторним використанням матеріалів і стейкхолдерською цінністю.

Зв’язки між цими класами формують онтологічну архітектуру: фізичний актив має цифрове представлення; процес змінює стан активу і споживає ресурс; учасник виконує процес, створює або перевіряє дані та несе визначену відповідальність; правило обмежує допустимі дії; документ підтверджує властивість; ризик впливає на строк, вартість і якість; інтегрований показник оцінює результат і запускає управлінське рішення. У такий спосіб технічна, економічна, екологічна та організаційна інформація поєднується в єдиному контурі простежуваного прийняття рішень.

Склад, атрибути й типові зв’язки базових класів керованих сутностей онтологічної архітектоники подано в табл. 1.6.

Виокремлені сім класів утворюють мінімально необхідний понятійний каркас, який дає змогу пов’язати матеріальні об’єкти, цифрові репрезентації, діяльність учасників, обмеження та вимірювані результати.

Запропонована декомпозиція створює підґрунтя для формування економіко-цифрової моделі управління, оскільки в ній технічні сутності безпосередньо поєднуються з економічними показниками. Наприклад, конструктивний елемент може бути пов’язаний із матеріалом, постачальником, вуглецевим слідом, кошторисною позицією, графіком монтажу, ризиком затримки, відповідальним підрядником і даними експлуатаційного моніторингу. Такий зв’язок перетворює ВІМ-об’єкт на економічно значущу управлінську одиницю, а не на геометричний елемент тривимірної моделі.

Індустрія 4.0 сформувала уявлення про підприємство як кіберфізичну систему, де фізичні процеси поєднуються з цифровими моделями, датчиками, мережевою взаємодією, автоматизованими рішеннями та аналітикою даних. Основними елементами цієї парадигми є кіберфізичні системи, інтернет речей,

хмарні сервіси, великі дані, роботизація, адитивне виробництво, горизонтальна й вертикальна інтеграція інформаційних потоків [36–37]. У будівництві ця логіка отримала розвиток у концепції Будівництво 4.0, але її практичне втілення ускладнюється унікальністю кожного об'єкта, тимчасовістю будівельних майданчиків, залежністю від погодних умов, територіальною розосередженістю ресурсів, регуляторною складністю та великою кількістю учасників [28; 38].

Таблиця 1.6

Базові онтологічні класи цифрової трансформації підприємства-стейкхолдера

Онтологічний клас	Зміст класу	Приклади атрибутів	Типові зв'язки
Фізичний актив	Матеріальні об'єкти побудованого середовища	місце розташування, розмір, матеріал, технічний стан, строк служби	є частиною; розміщений у; споживає; генерує; потребує обслуговування
Цифровий актив	Цифрові репрезентації, документи, моделі, набори даних, алгоритми	формат, версія, статус, автор, дата оновлення, рівень доступу	описує; підтверджує; оновлює; використовується для; пов'язаний із
Процес	Послідовність дій, що створює або змінює стан активу	тривалість, ресурсомісткість, бюджет, виконавець, залежність	виконується учасником; змінює актив; споживає ресурс; створює дані
Учасник	Учасник управлінської, виробничої, інвестиційної або регуляторної взаємодії	роль, компетенція, відповідальність, права доступу, договірні зобов'язання	відповідає за; затверджує; фінансує; постачає; контролює
Ресурс	Фінансові, матеріальні, трудові, інформаційні та енергетичні засоби	вартість, обсяг, доступність, якість, джерело походження	споживається процесом; належить учаснику; впливає на показник
Правило	Нормативне, контрактне, технічне або організаційне обмеження	джерело, сфера дії, обов'язковість, процедура перевірки	регулює; обмежує; дозволяє; вимагає; перевіряє
Інтегрований показник	Кількісний або якісний вимір результату й стану системи	формула, одиниця виміру, періодичність, поріг, відповідальний	оцінює; сигналізує; порівнює; запускає рішення

Джерело: узагальнено автором на основі [8–11; 13; 39; 42–44; 47–48].

Онтологічне значення Індустрія 4.0 для будівельної галузі полягає у появі нового типу керованих сутностей – подій, потоків даних, станів і алгоритмічних правил. У традиційній системі управління основними

одинацями були ресурс, робота, строк і кошторис. У цифровій системі до них додаються сенсор, сигнал, цифровий слід, подія відхилення, алгоритм прогнозування, автоматизоване повідомлення, сценарій реакції. Такий перехід змінює саму мову управління: підприємство отримує можливість бачити не тільки заплановані операції, а й фактичну поведінку процесів у часі.

Будівництво 4.0 не ліквідує потребу в класичному проєктному менеджменті, а переводить його в інформаційно насичений режим. Календарний план, кошторис, логістика, охорона праці, контроль якості й управління субпідрядниками можуть бути пов'язані з потоками даних із BIM-моделей, мобільних застосунків, дронів, сенсорів, ERP-систем і систем електронного документообігу. У такій архітектурі управлінський цикл скорочується: відхилення фіксується швидше, відповідальний актор і джерело відхилення визначаються точніше, а економічний ефект рішення може бути оцінений до фактичного загострення проблеми.

Водночас цифровізація виробничого рівня без онтологічної узгодженості не забезпечує сталого результату. Сенсорні дані, журнали робіт, моделі, кошториси та договори мають описувати один і той самий об'єкт у сумісних термінах. Якщо елемент у BIM-моделі, позиція у кошторисі, матеріал у закупівлі та робота в графіку не пов'язані між собою, аналітика не зможе коректно визначити економічний вплив відхилення. Тому Будівництво 4.0 потребує не тільки технічної інфраструктури, а й семантичної сумісності даних.

Функціональне співвідношення Індустрії 4.0, BIM, цифрового двійника та просторів даних розкрито в табл. 1.7.

Співвідношення концепцій відображає нарощування управлінської спроможності: BIM структурує об'єкт, цифровий двійник додає динаміку, а простір даних поширює керовану взаємодію на проєктну екосистему.

BIM є базовим елементом онтологічного підґрунтя цифрової трансформації будівництва, оскільки саме він переводить будівельний об'єкт у структурований цифровий опис. Помилкове ототожнення BIM із

тривимірною графікою звужує його управлінський потенціал. BIM має значення не тому, що створює візуальну модель, а тому, що фіксує об'єкти, їхні властивості, відносини, інформаційні вимоги, відповідальність і правила оновлення даних [8–10].

Таблиця 1.7

Онтологічне значення концепцій Індустрія 4.0, BIM, цифровий двійник і простори даних

Концепція	Первинна функція	Онтологічний внесок	Економіко-управлінський ефект
Індустрія 4.0 та Будівництво 4.0	Інтеграція фізичних і цифрових виробничих процесів	Вводить події, сенсори, потоки даних, автоматизовані правила, цифровий слід операцій	Скорочення циклу контролю, підвищення продуктивності, раннє виявлення відхилень
BIM	Структурований інформаційний опис об'єкта та його компонентів	Формує класи елементів, властивості, просторові та функціональні відносини, інформаційні вимоги	Координація проєктування, зниження колізій, зв'язок моделі з вартістю, строками та якістю
цифровий двійник	Динамічна репрезентація фізичного активу на основі поточних даних	Додає стан, поведінку, часову змінність, зворотний зв'язок, прогнозні сценарії	Прогнозне обслуговування, сценарне управління ризиками, оптимізація експлуатаційних витрат
простори даних	Керований міжорганізаційний обмін даними	Визначає правила довіри, доступу, використання, суверенності й сумісності даних	Масштабування ефектів BIM і цифровий двійник за межі одного підприємства або проєкту

Джерело: узагальнено автором на основі [8–13; 28; 36–50].

Стандарт ISO 19650 визначає BIM у зв'язку з управлінням інформацією, тобто з процесами обміну, запису, версіонування та організації даних для всіх учасників [10]. У такому підході інформаційна модель не є пасивним сховищем. Вона є організаційним механізмом, який задає структуру взаємодії: які інформаційні контейнери створюються, хто їх формує, у якому статусі вони перебувають, коли перевіряються, хто затверджує зміни і які рішення можуть на них спиратися. Спільне середовище даних виконує функцію інституційної пам'яті проєкту, де кожен елемент має контекст, статус і слід відповідальності.

Відкритий BIM-обмін посилює онтологічну роль BIM через використання відкритих і стандартизованих мов обміну даними, що забезпечує сумісність інформації між різними програмними продуктами, організаціями та учасниками [11]. У практичному сенсі це означає, що дані про об'єкт не мають бути заручниками одного програмного середовища. Відкриті стандарти дозволяють розглядати BIM як інтероперабельну систему знань про об'єкт, що може поєднувати проєктні, кошторисні, логістичні, екологічні та експлуатаційні дані.

Словник даних будівельної інформації створює додатковий семантичний рівень, забезпечуючи узгоджені терміни й визначення для опису побудованого середовища [44]. Його значення для економіко-цифрової моделі полягає у стандартизації властивостей, без якої неможливо коректно порівнювати дані різних проєктів, формувати галузеву аналітику, автоматизувати перевірку вимог або об'єднувати дані для оцінювання життєвого циклу. Саме на цьому рівні BIM починає працювати як семантичний каркас управління.

В українських умовах BIM має подвійну роль. З одного боку, він є технологічним інструментом підвищення якості проєктування, скорочення колізій і поліпшення координації. З іншого боку, він стає інституційним механізмом прозорості, особливо в контексті відновлення інфраструктури, використання міжнародного фінансування, контролю вартості та відповідності проєктів європейським вимогам [18; 20]. Обмеження впровадження BIM, описані в українських дослідженнях, свідчать, що основною проблемою є не тільки програмне забезпечення, а й зрілість організаційних процесів, стандартів, компетентностей та контрактних моделей [19; 21]. Управлінський та економічний зміст елементів BIM-онтології конкретизовано в табл. 1.8.

BIM набуває економіко-управлінського значення лише за умови зв'язку інформаційних контейнерів, класів, атрибутів, статусів і ролей із вартістю, строками, ризиками та відповідальністю.

Таблиця 1.8

ВІМ-онтологія як основа економіко-цифрового управління

Елемент ВІМ-онтології	Управлінський зміст	Економічна інтерпретація	Приклад використання
Інформаційний контейнер	Модель, документ або набір даних із визначеним статусом і власником	Доказова база для прийняття рішення, затвердження робіт або зміни бюджету	Контроль актуальності кошторису, прив'язаного до моделі
Клас об'єкта	Тип будівельного елемента, простору, системи або обладнання	Одиниця калькулювання, планування, ризику або LCA та LCC-оцінювання	Стіна, перекриття, вентиляційна система, ліфт
Атрибут	Кількісна або якісна характеристика об'єкта	Параметр вартості, ресурсоемності, строку служби, енергоефективності	Матеріал, площа, обсяг, коефіцієнт теплопередачі
Відношення	Зв'язок між об'єктами, процесами, акторами та документами	Логіка впливу одного елемента на інший у вартості, графіку або ризику	Елемент належить системі; робота виконується підрядником
Статус і версія	Фіксація зрілості, погодження та актуальності інформації	Зменшення транзакційних витрат і ризику помилкових рішень	Модель «для погодження», «для будівництва», «фактичного виконання»
Роль і відповідальність	Визначення учасника, що створює, перевіряє або затверджує дані	Прив'язка інформаційного ризику до управлінської відповідальності	ВІМ-менеджер, проєктувальник, кошторисник, технічний нагляд

Джерело: узагальнено автором на основі [8–11; 18–21; 44; 51].

Цифровий двійник є наступним рівнем онтологічної складності порівняно з ВІМ. ВІМ-модель фіксує структурований опис об'єкта та його запланованих або фактичних характеристик. Цифровий двійник додає до цього опису поточний стан, дані спостереження, поведінкові моделі, сценарне прогнозування і зворотний зв'язок. Тому ВІМ може бути інформаційним ядром цифрового двійника, але не кожна ВІМ-модель є цифровим двійником [39–41].

Дослідження С. Боє та співавторів показує, що семантичний цифровий двійник будівництва потребує ширшого підходу, ніж традиційний ВІМ, оскільки має охоплювати не тільки геометрію і проєктні дані, а й сенсорні мережі, контрольні системи, соціальні процеси, міські артефакти та динамічні

дані різних рівнів [39]. Ця позиція принципова для будівельного підприємства: цифровий двійник не є «покращеною 3D-моделлю», а є інструментом управління станами, подіями, ризиками і результатами.

У межах управління підприємством цифровий двійник виконує три функції. Перша – діагностична: він дає змогу бачити фактичний стан активу або процесу на основі даних сенсорів, оглядів, дронів, експлуатаційних журналів чи мобільних звітів. Друга – прогностична: модель дозволяє оцінювати ймовірність відмов, перевищення витрат, затримок, зростання енергоспоживання, прискореного зношення або виникнення небезпечних умов. Третя – оптимізаційна: цифровий двійник підтримує вибір сценарію ремонту, модернізації, зміни графіку, перерозподілу ресурсів або управління енергоспоживанням.

Економічний зміст цифрового двійника проявляється через управління повною вартістю життєвого циклу. Рішення, прийняті на етапі проектування, впливають на експлуатаційні витрати, ремонтпридатність, енергоспоживання, вуглецевий слід і залишкову вартість активу. Динамічна цифрова модель дозволяє перевести ці наслідки з рівня експертних припущень на рівень даних і сценарних оцінок. Цифровий двійник є необхідним елементом біосферосумісної економіко-цифрової моделі: він дає змогу враховувати не тільки початкову ціну будівництва, а й довгострокові екологічні та економічні ефекти.

Принципи побудови цифрових двійників, сформульовані для національної цифрової моделі побудованого середовища Великої Британії, підкреслюють, що цифрові двійники мають створюватися заради суспільної цінності, довіри та функціональності, а їхня сила полягає у федерації взаємопов'язаних двійників, а не в побудові однієї гігантської моделі [50]. Для будівельної галузі України ця ідея має прикладне значення: цифрові двійники об'єктів відновлення, транспортної, енергетичної, соціальної та житлової інфраструктури мають бути здатними до взаємодії, але така взаємодія потребує спільних правил даних, інформаційної безпеки та інституційної

довіри. Методологічне розмежування BIM-моделі та цифрового двійника здійснено в табл. 1.9.

Таблиця 1.9

**Розмежування BIM-моделі та цифрового двійника в управлінні
будівельним підприємством**

Критерій	BIM-модель	Цифровий двійник	Управлінський висновок
Основна функція	Структурований опис об'єкта та інформаційна координація	Моніторинг, симуляція та управління станом фізичного активу	BIM забезпечує основу, цифровий двійник забезпечує динаміку
Часовий вимір	Переважно проєктний, будівельний або стан фактичного виконання	Поточний і прогностичний стан у часі	Двійник потрібний для експлуатації, ризиків і сценарного управління
Джерела даних	Проєктні моделі, документи, класифікатори, атрибути	BIM, IoT, сенсори, експлуатаційні системи, історичні дані, аналітика	Розширення джерел потребує семантичної сумісності
Зворотний зв'язок	Може бути обмеженим або періодичним	Оновлення станів і подій є визначальною ознакою	Рішення приймаються на основі фактичної поведінки активу
Економічний ефект	Зниження колізій, контроль проєктної інформації, точніша координація	Оптимізація LCC, ремонту, енерговитрат, простоїв і ризиків	Цінність цифрового двійника зростає на довгих фазах життєвого циклу
Основна функція	Структурований опис об'єкта та інформаційна координація	Моніторинг, симуляція й управління станом фізичного активу	BIM забезпечує основу, цифровий двійник забезпечує динаміку

Джерело: узагальнено автором на основі [8–10; 39–41; 50].

Розмежування запобігає термінологічному змішуванню та обґрунтовує послідовність цифрової зрілості: від структурованої моделі об'єкта до динамічного прогнозування його стану й життєвоциклових витрат.

Простори даних формують четвертий компонент онтологічного підґрунтя цифрової трансформації будівництва. Їх поява зумовлена обмеженістю локальних інформаційних систем і окремих спільних середовищ даних. Спільне середовище даних у межах проєкту забезпечує координацію учасників конкретного будівельного процесу, але не розв'язує проблему масштабованого, довіреного та керованого обміну даними між підприємствами, державними органами, фінансовими інституціями,

виробниками матеріалів, експлуатаційними організаціями та незалежними аудиторами. Цю функцію виконують міжорганізаційні простори даних.

Європейська Комісія визначає спільні європейські простори даних як інфраструктурно-правові середовища, що дають змогу даним з різних джерел бути доступними та обмінюватися у безпечний і надійний спосіб, зберігаючи контроль власників над даними [45]. Регламент про дані, що застосовується в ЄС з 12 вересня 2025 р., посилює правову визначеність щодо доступу до даних і їх використання, зокрема даних, що генеруються підключеними пристроями [46]. Для будівництва це має безпосереднє значення, оскільки дані сенсорів, обладнання, будівельних матеріалів, експлуатаційних систем і цифрових платформ дедалі частіше стають економічним ресурсом.

простір даних не є єдиною централізованою базою даних. Його сутність полягає у поєднанні правил врядування, технічної інфраструктури, механізмів ідентифікації учасників, політик доступу, стандартів сумісності, контрактних умов використання даних і механізмів довіри. Центр підтримки просторів даних трактує простір даних через рамку врядування та одну або кілька взаємопов'язаних інфраструктур, що реалізують правила обміну [47]. Міжнародна асоціація просторів даних підкреслює значення суверенності даних, тобто контролю власника над тим, як його дані можуть використовуватися після передачі [48].

У будівельній галузі простори даних можуть виконувати щонайменше п'ять функцій. Перша – інтеграція даних про матеріали, походження, сертифікацію, вуглецевий слід і можливість повторного використання. Друга – підтримка прозорого управління відновленням і державними закупівлями через контроль доказових даних. Третя – формування реєстрів експлуатаційного стану інфраструктурних активів. Четверта – забезпечення ESG- та LCA-звітності на основі перевірених даних постачальників і підрядників. П'ята – створення умов для навчання моделей штучного інтелекту на якісних, стандартизованих і правомірно доступних даних.

Онтологічна роль простори даних полягає у перенесенні цифрової трансформації з рівня окремого підприємства на рівень екосистеми. Якщо BIM визначає структуру даних про об'єкт, а цифровий двійник забезпечує динаміку його стану, то простір даних визначає, як різні власники даних можуть взаємодіяти без втрати контролю, правової визначеності й довіри. У біосферосумісному будівництві це особливо важливо, оскільки екологічні та соціальні показники формуються не одним підприємством, а всією мережею постачання, будівництва та експлуатації. За таких умов простір даних виконує функцію міжорганізаційного середовища узгодження семантики, прав доступу, відповідальності та правил використання інформації. Це забезпечує простежуваність походження даних і збереження їх доказовості на всіх етапах життєвого циклу будівельного активу. Водночас формується інформаційна основа для порівняння альтернативних проєктних рішень за економічними, екологічними та стейкхолдерними критеріями в межах єдиного цифрового контуру.

Інтегровану послідовність формування онтологічної архітектури цифрової трансформації будівельного підприємства подано на рис. 1.2.

Архітектура демонструє, що цифрова трансформація набуває управлінської завершеності лише після поєднання класів сутностей із контурами взаємодії, правилами даних і вимірюваними результатами.

Поєднання Індустрія 4.0, BIM, цифровий двійник і простори даних дає підстави сформувати інтегровану онтологічну архітектуру цифрової трансформації будівельного підприємства. Її логіка полягає у нарощуванні управлінської складності: від формалізації об'єктів і понять до міжорганізаційного обміну даними та економічного оцінювання рішень. У такій архітектурі кожен рівень виконує власну функцію й одночасно створює передумови для наступного рівня.

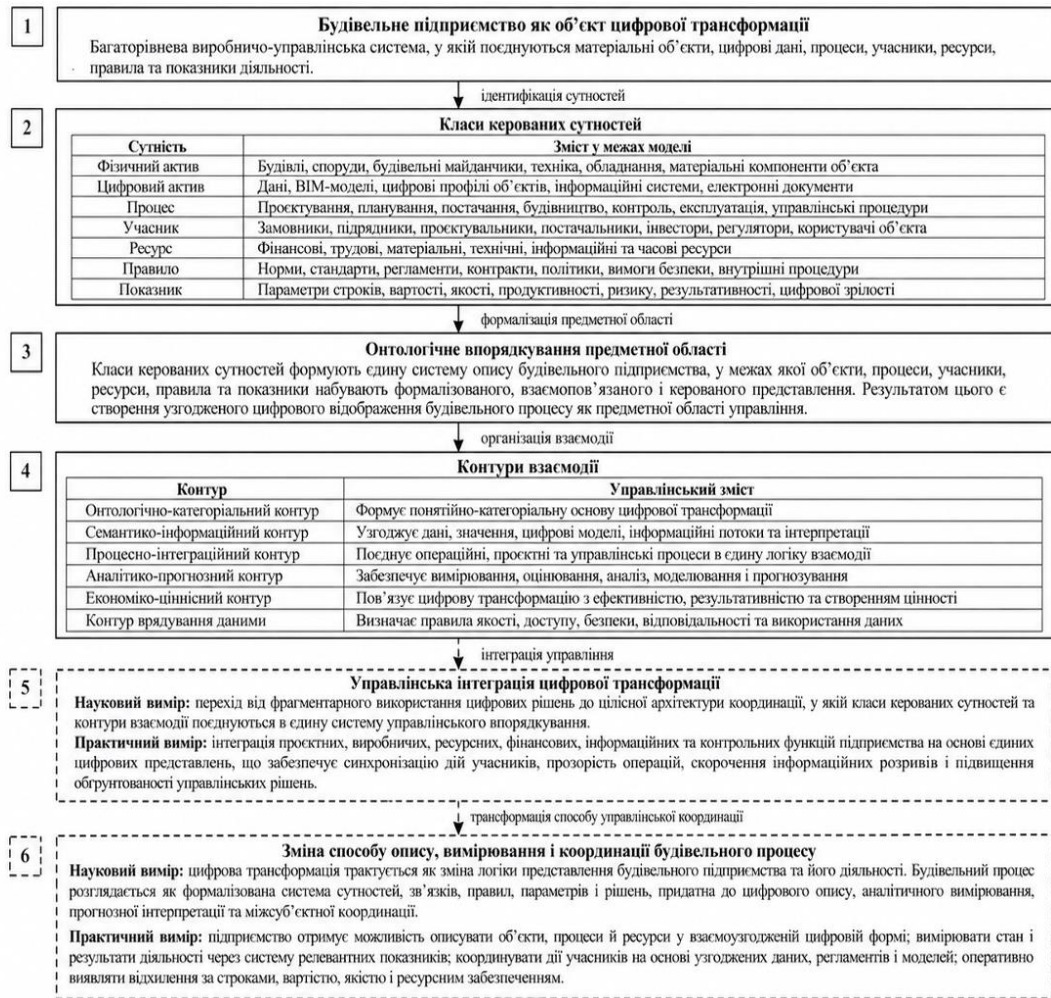


Рис. 1.2. Онтологічна архітектура цифрової трансформації будівельного підприємства

Джерело: розроблено автором.

Перший рівень – онтологічно-категоріальний. Він визначає базові класи предметної області: активи, процеси, актори, ресурси, правила, дані, показники. Без цього рівня цифровізація залишається набором несумісних інформаційних об'єктів. Другий рівень – семантико-інформаційний. Він забезпечує класифікацію, властивості, унікальні ідентифікатори, формати і правила опису даних. Саме тут набувають значення IFC, bSDD, класифікатори, відкриті стандарти та інформаційні вимоги. Третій рівень – процесно-інтеграційний. Він пов'язує BIM, спільне середовище даних, ERP, календарно-ресурсне планування, закупівлі, документообіг і виробничий контроль. Четвертий рівень – аналітико-прогнозний. Він використовує цифрові двійники, сенсорні дані, штучний інтелект і сценарне моделювання для прогнозування ризиків і результатів. П'ятий рівень – економіко-ціннісний. Він

переводить дані у показники вартості, строків, продуктивності, ризику, якості, LCC, LCA та ESG. Шостий рівень – врядування даними та довіра. Він регламентує права доступу, використання, перевірку, відповідальність і міжорганізаційний обмін у простори даних.

Наукова новизна запропонованої архітектури полягає у розмежуванні технологічного, семантичного, процесного, аналітичного, економічного та інституційного контурів цифрової трансформації будівельного підприємства. Такий підхід дає змогу уникнути двох крайнощів: технократичного зведення трансформації до програмного забезпечення і декларативного ототожнення цифровізації з інноваційністю. Економіко-цифрова модель виникає лише тоді, коли цифрові об'єкти пов'язані з управлінськими діями, а управлінські дії – з вимірюваними економічними, екологічними та соціальними результатами.

Розроблена архітектура також пояснює, чому підприємства з однаковим набором цифрових інструментів можуть отримувати різні результати. Причина полягає не лише у вартості програм або кваліфікації окремих фахівців, а у ступені онтологічної узгодженості цифрової системи. Якщо дані мають спільну семантику, визначених власників, зв'язок із процесами, правилами та показниками, вони стають основою управління. Якщо такої узгодженості немає, цифрові інструменти створюють додаткові інформаційні масиви, але не забезпечують якісного управлінського переходу. Структуру інтегрованої онтологічної архітектоніки та очікувані результати функціонування кожного контуру наведено в табл. 1.10.

Сукупність контурів формує логічний перехід від єдиної мови опису сутностей до прогнозування, економічного оцінювання та проєктно-інтегрованого врядування даними й довірою.

Онтологічний підхід має безпосереднє методологічне значення для побудови економіко-цифрових моделей управління будівельними підприємствами. Він задає правила переходу від опису технологій до формування вимірюваної управлінської системи. Без онтології неможливо коректно визначити, що саме цифровізується: окрема операція, бізнес-процес,

проект, портфель активів, ланцюг постачання або стейкхолдерська екосистема. Відповідно, без онтології неможливо обґрунтовано сформувати систему показників, оскільки показник має бути прив'язаний до конкретного об'єкта, процесу, правила, джерела даних і відповідального учасника.

Таблиця 1.10

Контури інтегрованої онтологічної архітектури економіко-цифрової моделі

Контур	Напрямок дій	Інструменти та стандарти	Очікуваний результат
Онтологічно-категоріальний	Які сутності та зв'язки становлять предмет управління?	класи об'єктів, атрибути, відносини, життєвий цикл	єдина мова опису активів, процесів, акторів і показників
Семантико-інформаційний	Як зробити дані зрозумілими для різних систем та учасників?	IFC, bSDD, класифікатори, унікальні ідентифікатори	інтероперабельність і можливість автоматизованої перевірки
Процесно-орієнтований	Як поєднати модель з виробничими та управлінськими процесами?	BIM, спільне середовище даних, ERP, календарно-ресурсні системи, документообіг	наскрізний зв'язок планування, виконання, контролю й звітності
Аналітико-прогнозний	Як перетворити дані на прогноз і сценарій дії?	цифровий двійник, IoT, великі дані, ШІ, симуляційні моделі	раннє виявлення ризиків, сценарне управління, прогнозне обслуговування
Економіко-ціннісний	Як виміряти управлінський ефект цифровізації?	основні показники результативності, LCC, LCA, ESG-метрики, контролінг, бюджетування	оцінювання вартості, строків, продуктивності, ризиків і сталості
Проектно-інтегрований контур врядування даними та довіри	Як забезпечити контрольований обмін даними між учасниками?	простори даних, Регламент про дані, IDSA RAM, політики доступу	суверенність даних, довіра, правова визначеність, масштабування взаємодії

Джерело: узагальнено автором на основі [8–13; 28; 36–50].

Аналітичне значення підходу проявляється у можливості розмежувати три рівні цифрової зрілості. Перший рівень – інструментальний, коли підприємство використовує окремі цифрові засоби для проектування, кошторисування або комунікації. Другий рівень – інтеграційний, коли цифрові інструменти пов'язані зі спільним середовищем даних, регламентами, ролями та процесами. Третій рівень – онтологічно-екосистемний, коли дані мають спільну семантику, підтримують цифрові двійники, використовуються для

економічного прогнозування й можуть безпечно обмінюватися між учасниками через простори даних. Саме третій рівень відповідає логіці біосферосумісного та стейкхолдерсько орієнтованого управління.

Практичне значення для українських будівельних підприємств полягає у тому, що цифрова трансформація має починатися не з вибору програмного забезпечення, а з опису інформаційної архітектури управління. Потрібно визначити, які дані є критичними для вартості, строків, ризиків, якості, вуглецевого сліду та стейкхолдерських зобов'язань; хто є власником цих даних; які стандарти опису застосовуються; як дані переходять між проєктуванням, закупівлями, будівництвом та експлуатацією; які рішення приймаються на їх основі. Така постановка особливо важлива в умовах відновлення України, де цифрова прозорість має поєднувати економічну ефективність, міжнародну довіру та довгострокову якість активів.

У методичному аспекті онтологічна архітектура дозволяє обґрунтувати вибір подальших методів аналізу. Класифікація цифрових об'єктів і процесів створює основу для морфологічного аналізу моделей управління. Зв'язок між даними, процесами та показниками дає підстави для побудови системи критеріїв оцінювання ефективності. Визначення ролей і правил доступу забезпечує основу для аналізу стейкхолдерської взаємодії. Перехід від ВІМ до цифрового двійника дає змогу застосовувати сценарне моделювання, ризик-аналіз і прогнозування життєвого циклу. Простори даних відкривають можливість аналізувати міжорганізаційну координацію та довіру як економічні чинники. Бар'єри цифрової трансформації, відповідні онтологічні способи їх подолання та управлінські ефекти систематизовано в табл. 1.11.

Подолання цифрової фрагментованості потребує не стільки розширення набору програмних засобів, скільки узгодження семантики, ролей, інформаційної відповідальності та зв'язку даних із показниками результативності.

Отже, цифрова трансформація будівельної галузі має онтологічну природу, оскільки змінює не лише інструменти управління, а й спосіб

представлення будівельного підприємства, об'єкта, процесу, ресурсу, відповідальності та результату. Будівельний актив у цифровій економіці є одночасно фізичним об'єктом і сукупністю структурованих даних, що мають економічне, технічне, екологічне та соціальне значення.

Таблиця 1.11

Бар'єри цифрової трансформації підприємств-стейкхолдерів та онтологічні способи їх подолання

Бар'єр	Прояв у будівельному підприємстві	Онтологічний спосіб подолання	Очікуваний управлінський ефект
Фрагментованість даних	моделі, кошториси, графіки, акти та звіти існують у різних системах	єдина класифікація об'єктів, атрибутів, процесів і показників	зменшення дублювання, кращий план-факт контроль
Несумісність програмних середовищ	втрата даних при передачі між проєктувальником, підрядником і замовником	відкрита BIM-взаємодія, IFC, спільне середовище даних, стандартизовані інформаційні вимоги	інтероперабельність і зниження транзакційних витрат
Слабка відповідальність за дані	не визначено, хто створює, перевіряє й затверджує інформацію	рольова модель, статуси інформаційних контейнерів, правила версіонування	простежуваність рішень і зменшення інформаційних ризиків
Дефіцит цифрових компетенцій	BIM або аналітика сприймаються як функція окремого фахівця	закріплення цифрових ролей у процесах і компетентнісній моделі підприємства	перехід від локального експертного знання до організаційної спроможності
Обмежена економічна доказовість цифровізації	інвестиції в технології не пов'язані з показниками ефекту	прив'язка цифрових даних до основні показники результативності, LCC, LCA, ризиків і продуктивності	обґрунтування цифрових інвестицій через вимірювані результати
Недостатня довіра між учасниками	учасники не готові відкривати дані через комерційні та юридичні ризики	простори даних, політики доступу, суверенність даних, контрактні правила використання	масштабування цифрової взаємодії без втрати контролю над даними

Джерело: узагальнено автором на основі [10–11; 18–21; 45–48].

Обґрунтовано, що Індустрія 4.0, BIM, цифровий двійник і простори даних виконують різні, але взаємодоповнювальні онтологічні функції. Індустрія 4.0 і Будівництво 4.0 вводять у систему управління кіберфізичні процеси, події, сенсорні дані й автоматизовані правила. BIM формує інформаційно-семантичне ядро об'єкта, визначаючи класи елементів, атрибути, зв'язки, статуси, версії та відповідальність. цифровий двійник додає динамічний стан, часову змінність, прогноз і зворотний зв'язок між фізичним активом та цифровою моделлю. простори даних забезпечують довірений, керований і правово визначений міжорганізаційний обмін даними.

Визначено базові онтологічні класи цифрової трансформації будівельного підприємства: фізичний актив, цифровий актив, процес, актор, ресурс, правило та показник. Їхнє поєднання через відносини «є частиною», «описує», «виконує», «споживає», «підтверджує», «регулює», «оцінює» створює основу для інтеграції технічних, економічних, екологічних та стейкхолдерських даних.

Запропоновано інтегровану онтологічну архітектуру економіко-цифрової моделі управління будівельним підприємством, що включає шість контурів: онтологічно-категоріальний, семантико-інформаційний, процесно-інтеграційний, аналітико-прогнозний, економіко-ціннісний та контур врядування даними й довіри. Наукове значення архітектури полягає у розмежуванні рівнів цифрової трансформації та доведенні, що економіко-цифрова модель виникає тільки за умови зв'язку цифрових об'єктів із процесами, ролями, правилами й вимірюваними результатами.

Доведено, що BIM-модель і цифровий двійник мають різну управлінську природу. BIM забезпечує структуровану інформаційну основу, тоді як цифровий двійник формує динамічну систему спостереження, прогнозування та оптимізації. Таке розмежування запобігає термінологічній невизначеності й дає змогу коректно визначати цифрову зрілість підприємства.

Практичне значення одержаних результатів полягає у формуванні логіки переходу українських будівельних підприємств від фрагментарного

використання цифрових засобів до керованої економіко-цифрової архітектури. Першочерговими напрямками є стандартизація інформаційних вимог, розвиток спільного середовища даних, застосування відкритої ВІМ-взаємодії, визначення ролей управління даними, розвиток цифрових компетентностей, прив'язка цифрових даних до показників результативності, вартості й оцінювання життєвого циклу, ризиків та показників екологічної, соціальної й управлінської відповідальності, а також поступовий перехід до міжорганізаційних просторів даних.

1.3. Теоретико-методологічні засади управління екосистемою підприємств-стейкхолдерів проєктів біосферосумісного будівництва

Перехід підприємств-стейкхолдерів до біосферосумісної логіки розвитку змінює не лише технологічну основу проєктування, будівництва й експлуатації об'єктів, а й природу управлінської взаємодії. Управління проєктною екосистемою доцільно трактувати як цілеспрямовану оркестрацію автономних, але взаємозалежних учасників, об'єднаних спільною ціннісною пропозицією, цифровими потоками даних, розподіленими ризиками та біосферними обмеженнями. У цьому підрозділі зазначене положення конкретизовано для підприємств, що виконують змінні функціональні ролі впродовж життєвого циклу будівельного активу.

Безпосереднім об'єктом управлінського моделювання в роботі є підприємства-стейкхолдери, тобто суб'єкти господарювання, які виконують визначені ролі у створенні, фінансуванні, проєктуванні, ресурсному забезпеченні, спорудженні, цифровому супроводі та експлуатації об'єкта. Інші стейкхолдери, зокрема органи публічного управління, громади, професійні об'єднання та користувачі, формують зовнішній інституційний і соціальний контур проєкту. Таке розмежування не послаблює їх значення, а встановлює межі авторських моделей: вони оцінюють економіко-цифрове управління підприємствами з урахуванням впливу ширшої сукупності стейкхолдерів.

Екосистема підприємств-стейкхолдерів має динамічну конфігурацію. На передпроектній стадії визначальними є інвестори, девелопери, проєктні та консалтингові підприємства; під час ресурсної підготовки й будівництва зростає роль підрядників, постачальників, логістичних та інжинірингових організацій; на стадії експлуатації провідного значення набувають оператори, сервісні підприємства й управителі активів. Зміна ролей супроводжується перерозподілом інформаційних повноважень, відповідальності, ризиків і очікуваної частки цінності. Тому модель управління має передбачати не разову ідентифікацію учасників, а регулярне оновлення їхнього статусу відповідно до стадії життєвого циклу проєкту.

Будівельна галузь належить до сфер із високою матеріаломісткістю, тривалим життєвим циклом активів, складною контрактною структурою та значним впливом на довкілля. За оцінками Програми ООН з довкілля, будівлі та будівництво залишаються однією з найбільш ресурсомістких сфер світової економіки, що формує істотну частку викидів вуглецю та матеріального споживання [52]. У таких умовах управління стейкхолдерами не може обмежуватися комунікаційним супроводом проєкту. Воно перетворюється на механізм формування легітимності, довіри, розподілу відповідальності, контролю життєвого циклу, запобігання конфліктам і забезпечення довгострокової суспільної цінності.

Методологічне обґрунтування підрозділу спирається на поєднання екосистемного, інституційного, мережевого, процесного, життєвоциклового та ціннісно-орієнтованого підходів. Екосистемний підхід дає змогу розглядати проєкт як конфігурацію взаємозалежних підприємств і організацій; інституційний розкриває правила, стандарти та механізми відповідальності; мережевий виявляє прямі й опосередковані зв'язки; процесний визначає послідовність взаємодії; життєвоцикловий пов'язує рішення різних фаз; ціннісно-орієнтований пояснює розподіл створюваних вигід і витрат. Їх поєднання з контрактними, реляційними, колаборативними та інформаційно-

аналітичними механізмами зменшує конфліктність, інформаційну асиметрію й ризик невиконання екологічних зобов'язань [3–5; 53–58; 61–63; 280–284].

Теоретична основа управління стейкхолдерами сформувалася у стратегічному менеджменті. Р. Фрімен запропонував розглядати підприємство як систему відносин із групами, що впливають на діяльність організації або зазнають впливу її рішень [3]. Ця ідея змінила класичне уявлення про підприємство як інструмент задоволення лише інтересів власників. У подальших працях Т. Дональдсона і Л. Престона теорія стейкхолдерів була розкрита як описова, інструментальна і нормативна рамка управління, що поєднує аналіз реальних відносин, оцінювання впливу на результативність та етичне обґрунтування відповідальності підприємства [53]. М. Кларксон деталізував підхід до аналізу груп впливу через розмежування первинних і вторинних сторін, наголошуючи, що виживання організації залежить від здатності підтримувати сталі відносини з групами, без яких діяльність неможлива [54].

Методологічний розвиток цієї теорії пов'язаний із моделлю салієнтності Р. Мітчелла, Б. Ейгла та Д. Вуда, де значущість сторін визначається поєднанням влади, легітимності та терміновості їхніх вимог [4]. Для будівельного проєкту ця модель має особливу цінність, оскільки дозволяє відрізняти формально важливих учасників від тих, чийі вимоги можуть швидко змінити графік, бюджет, репутаційний стан або дозвільну траєкторію проєкту. Т. Роулі розвинув мережеву логіку аналізу, довівши, що вплив сторін залежить не лише від їхньої позиції відносно підприємства, а й від щільності, центральності та структури зв'язків у ширшій мережі [5]. У контексті будівництва це означає, що конфлікт громади, регулятора або постачальника може поширюватися на інвесторів, органи влади, медіа та майбутніх користувачів, змінюючи конфігурацію ризиків.

У проєктному менеджменті управління стейкхолдерами поступово інституціоналізувалося як окрема сфера планування, аналізу, комунікації та залучення. Настанови Інституту управління проєктами закріплюють

необхідність ідентифікації сторін, аналізу їхніх очікувань, планування взаємодії та постійного моніторингу змін у рівні впливу й зацікавленості [55]. Міжнародний стандарт з управління проєктами також підкреслює значення погодження цілей, відповідальності, інформаційних потоків та управлінських рішень між учасниками [56]. Для будівництва ця логіка має посилене значення через проєктну унікальність, залежність від дозвільних процедур, значну кількість субпідрядників, ланцюгів постачання та публічних наслідків реалізації об'єкта [285-287].

Галузеві дослідження будівництва конкретизували загальні положення теорії. С. Оландер і А. Ландін показали, що вплив сторін у будівельних проєктах змінюється залежно від фази реалізації, а його недооцінювання може спричиняти затримки, перегляд проєктних рішень та конфлікти [57]. Цз. Ян та співавтори систематизували чинники результативного управління сторонами в будівельних проєктах, серед яких особливе значення мають рання ідентифікація, чітка комунікація, підтримка керівництва, управління конфліктами та постійне оновлення інформації про очікування учасників [58]. Результати підтверджують, що управління стейкхолдерами у будівництві є не допоміжною комунікаційною процедурою, а складовою економічної результативності, адже впливає на строки, вартість, якість, прийнятність рішень і ризик зупинення проєкту.

Посилення вимог сталого розвитку й екологічної, соціальної та управлінської відповідальності радикально розширило предмет управління стейкхолдерами. Підхід Дж. Елкінгтона до потрійного результату заклав основу поєднання економічних, екологічних і соціальних ефектів діяльності [23]. Європейська таксономія сталих видів діяльності, Директива щодо корпоративної звітності зі сталого розвитку та Європейські стандарти звітності формують нормативну рамку, у якій підприємства мають доводити не тільки фінансову ефективність, а й відповідність діяльності цілям кліматичної, ресурсної та соціальної відповідальності [16–17; 59; 290]. Для будівельних підприємств це означає потребу переходу від ситуативного залучення сторін до доказового управління впливами на всіх фазах життєвого

циклу об'єкта. Еволюцію підходів до управління підприємствами-стейкхолдерами й іншими учасниками будівельних проєктів узагальнено в табл. 1.12.

Таблиця 1.12

Еволюція підходів до управління підприємствами-стейкхолдерами та іншими учасниками будівельних проєктів

Етап розвитку	Зміст управлінської логіки	Домінуючий об'єкт аналізу	Обмеження підходу	Значення для біосферосумісного будівництва
Класична договірна взаємодія	Управління відносинами замовника, проєктувальника і підрядника через контракти, кошториси та графіки	Виконання робіт і дотримання договірних зобов'язань	Слабке врахування громад, користувачів, екологічних ефектів і довгострокової експлуатації	Є недостатньою для проєктів із високою суспільною та екологічною значущістю
Теорія стейкхолдерів	Підприємство розглядається як система відносин із групами впливу	Інтереси, вимоги, права і ресурси учасників	Переважно статичне бачення сторін без глибокого аналізу мережевих зв'язків	Дозволяє розширити коло учасників поза межами традиційного контракту
Мережевий підхід	Оцінюється не тільки вплив окремої сторони, а й структура зв'язків між учасниками	Щільність, центральність, взаємозалежність і поширення впливу	Потребує значного обсягу даних і постійного оновлення карти взаємодії	Дає змогу бачити проєкт як екосистему, а не як набір двосторонніх відносин
Проєктно-орієнтований підхід	Залучення сторін планується, виконується і контролюється протягом життєвого циклу проєкту	Фази проєкту, очікування, комунікації, конфлікти	Часто зосереджується на строках і вартості без достатньої екологічної глибини	Формує процедурну основу постійного управління взаємодією
Стала та відповідальна модель	Економічні, екологічні, соціальні й управлінські наслідки інтегруються у рішення	Впливи життєвого циклу, вуглецевий слід, безпека, прозорість, участь громад	Потребує узгоджених показників, даних і системи верифікації	Є методологічною основою біосферосумісного будівництва
Цифрово-екосистемна модель	Взаємодія сторін підтримується спільним середовищем даних, інформаційним моделюванням і цифровою звітністю	Дані, права доступу, відповідальність, показники, рішення	Потребує цифрової зрілості, довіри та інституційної спроможності	Забезпечує доказовість, прозорість і керованість впливів

Джерело: узагальнено автором на основі [3–5; 16–17; 23; 55–59].

Еволюція підходів засвідчує перехід від статичної договірної взаємодії до динамічного цифрово-екосистемного управління впливами, ризиками та цінністю впродовж життєвого циклу.

Екосистема стейкхолдерів біосферосумісного будівництва є багаторівневою сукупністю учасників, відносин, ресурсів, правил, інформаційних потоків і результатів, що виникають навколо створення, експлуатації, оновлення та виведення з експлуатації будівельного активу. Її відмінність від традиційної сукупності учасників будівництва полягає у трьох ознаках. По-перше, вона охоплює весь життєвий цикл, а не лише фазу будівництва. По-друге, вона включає тих учасників, які не завжди мають прямий контракт, але впливають на суспільну прийнятність і довгострокову цінність проєкту. По-третє, вона пов'язує економічні рішення з екологічними, соціальними та управлінськими наслідками.

У центрі такої екосистеми перебуває не окреме підприємство, а проєкт як вузол створення цінності. Замовник формує цільові параметри об'єкта, інвестор визначає фінансову рамку і вимоги до ризику, проєктувальники перетворюють потреби на технічні рішення, підрядники організовують виробниче виконання, постачальники впливають на матеріальний слід, оператори забезпечують експлуатаційну результативність, органи влади задають нормативні вимоги, громади оцінюють соціальну прийнятність, користувачі формують майбутню споживчу цінність. Результат проєкту залежить від того, чи здатна система управління поєднати ці різні логіки у спільний контур відповідальності.

Біосферосумісність змінює ієрархію управлінських критеріїв. Якщо традиційний проєкт орієнтується на вартість, строк і якість, то біосферосумісний проєкт додатково потребує оцінювання ресурсної ефективності, вуглецевого сліду, частки повторного використання матеріалів, впливу на здоров'я та безпеку, доступності для користувачів, прозорості ланцюгів постачання, відповідності принципам доброчесного врядування та довіри з боку громад. Світова рада із зеленого будівництва підкреслює

необхідність координованих дій між усіма учасниками будівельного ланцюга для зменшення вбудованого вуглецю [35], а аналітичні матеріали Арп і Фонду Еллен Макартур розкривають значення циркулярності в побудованому середовищі [60].

Методологічно екосистема стейкхолдерів має аналізуватися не лише за переліком учасників, а за структурою їхніх внесків, очікувань і ризиків. Для цього доцільно виділяти п'ять вимірів. Ресурсний вимір показує, хто надає фінанси, матеріали, компетенції, дані та легітимність. Інтересовий вимір фіксує очікування щодо прибутковості, безпеки, якості, екологічності, соціального ефекту. Владний вимір визначає спроможність впливати на рішення, дозволи, фінансування або суспільну підтримку. Ризиковий вимір показує, які ризики несе кожна сторона і які ризики вона створює для інших. Данієвий вимір відображає, які дані сторона генерує, отримує, перевіряє або використовує для прийняття рішень.

Групи учасників проєктної екосистеми, їхні інтереси, ресурси, суперечності та механізми взаємодії представлено в табл. 1.13.

Таблиця 1.13

**Групи підприємств-стейкхолдерів та інших учасників проєктів
біосферосумісного будівництва та управлінські механізми взаємодії**

Група учасників	Очікування та інтереси	Ресурси і вплив	Імовірні суперечності	Механізми управління взаємодією
Замовник та інвестор	Повернення інвестицій, контроль строків і вартості, відповідність вимогам сталого фінансування	Фінансові ресурси, інвестиційні критерії, право затвердження рішень	Тиск на бюджет може конфліктувати з довгостроковою ресурсною ефективністю	Цільові показники життєвого циклу, прозорі правила зміни проєкту, контроль вартості володіння
Проектувальники та технічні консультанти	Якість рішень, нормативна відповідність, мінімізація помилок, професійна відповідальність	Компетенції, інформаційні моделі, технічні розрахунки	Недостатнє раннє залучення підрядників і постачальників	Спільне середовище даних, погодження інформаційних вимог, міждисциплінарні перевірки

Продовження табл. 1.13

1	2	3	4	5
Підрядники та субпідрядники	Керованість виконання, стабільність оплати, зрозумілі вимоги, безпечні умови	Виробничі потужності, персонал, технології, графік робіт	Конфлікти через зміни, затримки, розподіл відповідальності	Спільне планування, раннє виявлення ризиків, цифровий контроль виконання
Постачальники матеріалів і обладнання	Прогнозований попит, прозорі вимоги, своєчасні розрахунки	Матеріали, сертифікати, логістика, дані про походження ресурсів	Невизначеність цін, дефіцит матеріалів, недостатня доказовість екологічних характеристик	Паспорти матеріалів, перевірка ланцюгів постачання, вимоги до повторного використання
Органи влади та регулятори	Дотримання норм, безпека, законність, розвиток території	Дозволи, нормативні вимоги, контроль і нагляд	Затримки погоджень, зміни норм, різне тлумачення вимог	Цифрова прозорість документації, простежуваність рішень, попередні консультації
Громади та кінцеві користувачі	Безпека, доступність, якість середовища, мінімізація негативних впливів	Суспільна легітимність, зворотний зв'язок, репутаційний вплив	Недовіра, спротив забудові, конфлікти щодо просторових і екологічних наслідків	Публічне розкриття впливів, консультації, механізм реагування на скарги
Оператори та власники активу	Низькі експлуатаційні витрати, ремонтпридатність, надійність, енергоефективність	Експлуатаційні дані, знання реального стану активу	Проектні рішення можуть не враховувати майбутню експлуатацію	Включення експлуатаційних вимог у початкове завдання, цифровий паспорт активу

Джерело: узагальнено автором на основі [3–5; 8; 10; 35; 55–58; 60–61].

Групування учасників дає змогу встановити джерела ресурсів, впливу й потенційних конфліктів, а також диференціювати механізми координації відповідно до ролі кожної сторони у створенні проектної цінності.

Визначені групи учасників мають функціонувати як взаємозалежні носії ресурсів, даних, знань, нормативних вимог, ризиків, відповідальності та очікуваних результатів. Координація їхніх внесків здійснюється через спільне цифрове середовище, у межах якого проектний, інформаційно-цифровий і стійкісно-резильєнтний контури пов'язують управлінські рішення з фактичними параметрами реалізації та експлуатації будівельного активу.

Екосистемну модель такої взаємодії наведено на рис. 1.3. Представлена модель відображає підприємство-стейкхолдера як координаційний вузол проєктної екосистеми, через який узгоджуються взаємодії замовника, проєктувальника, підрядника, постачальника, оператора експлуатації, регулятора, громади та користувачів об'єкта.

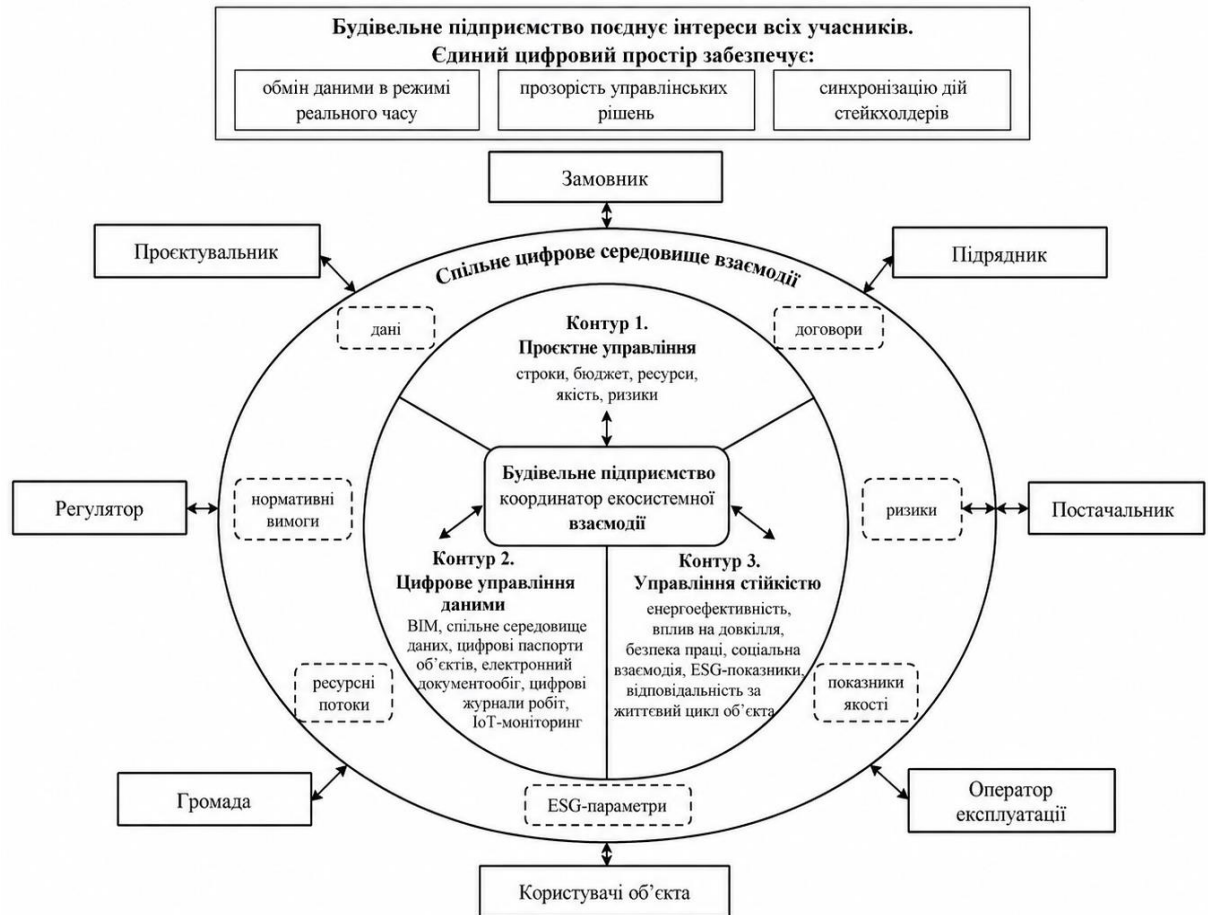


Рис. 1.3. Екосистемна модель координації взаємодії підприємства-стейкхолдера з учасниками проєкту біосферосумісного будівництва

Джерело: розроблено автором.

Проєктний контур забезпечує координацію строків, бюджету, ресурсів, якості й ризиків; контур цифрового управління даними формує інформаційну основу рішень; контур управління стійкістю пов'язує економічну результативність із безпекою, екологічними впливами, соціальною взаємодією та життєвоцикловою цінністю активу. Поєднання цих контурів створює основу для подальшої ідентифікації значущості учасників, визначення

способів їх залучення та динамічного розподілу відповідальності за фазами проєкту.

Ідентифікація стейкхолдерів у біосферосумісному будівництві має здійснюватися на ранній фазі формування проєктної концепції, оскільки саме на цьому етапі ухвалюються рішення, що визначають більшу частину майбутнього впливу об'єкта на довкілля, вартість володіння, соціальну прийнятність і можливість подальшого повторного використання матеріалів. Запізніле залучення сторін зменшує простір управлінського маневру і переводить взаємодію у режим реагування на конфлікти, а не попередження ризиків. Тому аналіз сторін повинен передувати детальному проєктуванню, контрактуванню та закупівлям.

Методична послідовність аналізу має включати шість взаємопов'язаних дій. Перша дія – формування повного реєстру сторін за фазами життєвого циклу. Друга – визначення їхніх інтересів, ресурсів, очікувань і можливих втрат. Третя – оцінювання впливу, легітимності та терміновості вимог. Четверта – побудова карти взаємозв'язків, що показує, як рішення однієї сторони змінює поведінку інших. П'ята – визначення стратегії залучення: інформування, консультування, спільне рішення, партнерство або контроль. Шоста – встановлення показників взаємодії, які дають змогу оцінити не кількість проведених комунікацій, а фактичний вплив взаємодії на строки, вартість, ризики, рівень довіри та прийнятність проєкту.

Традиційна матриця впливу та зацікавленості залишається корисною для первинного упорядкування учасників, але її недостатньо для біосферосумісного будівництва. Вона не відображає екологічного впливу, часової зміни очікувань, мережевих залежностей і якості даних. Модель салієнтності дає глибше розуміння пріоритетності сторін, але також потребує доповнення параметрами сталості. Мережевий аналіз дозволяє побачити структуру взаємного впливу, проте його застосування потребує даних про комунікації, договірні зв'язки, спільні рішення та конфлікти. Ціннісно-мережевий аналіз доповнює це бачення, оскільки показує, які матеріальні,

інформаційні, фінансові й нематеріальні потоки формують цінність для кожного учасника [62].

Цифровізація змінює методичний апарат аналізу. Спільне середовище даних, інформаційне моделювання будівель та цифрові паспорти матеріалів дозволяють фіксувати не лише наявність сторін, а й їхній конкретний внесок, відповідальність, статус рішень, інформаційні зобов'язання та підтвердження виконання. Дослідження впливу інформаційного моделювання на комунікаційні мережі будівельного проєкту показує, що цифрова модель може змінювати структуру взаємодії між учасниками, посилюючи прозорість і соціальний капітал проєктної мережі [63]. Отже, методика управління сторонами має поєднувати якісну експертну оцінку з цифровою простежуваністю рішень. Методичний інструментарій аналізу підприємств-стейкхолдерів систематизовано в табл. 1.14.

Таблиця 1.14

Методичні інструменти аналізу підприємств-стейкхолдерів та інших учасників у проєктах біосферосумісного будівництва

Інструмент	Аналітичне призначення	Переваги	Обмеження
Матриця впливу та зацікавленості	Первинне групування сторін за рівнем впливу і зацікавленості	Проста, наочна, придатна для раннього етапу	Не показує взаємозв'язків і динаміки вимог
Модель салієнтності	Оцінювання влади, легітимності та терміновості вимог	Дозволяє визначати пріоритет реагування	Не враховує повною мірою цінність життєвого циклу
Мережевий аналіз	Виявлення структури зв'язків між учасниками	Показує непрямий вплив, центральність і залежності	Потребує якісних даних про зв'язки
Ціннісно-мережевий аналіз	Визначення потоків цінності між учасниками	Показує, хто створює, отримує або блокує цінність	Складність кількісного оцінювання нематеріальних ефектів
Аналіз життєвого циклу	Оцінювання екологічних впливів матеріалів, конструкцій і процесів	Дає доказову основу для сталих рішень	Потребує якісних даних про матеріали та експлуатацію
Аналіз вартості життєвого циклу	Оцінювання не лише інвестиційних, а й експлуатаційних та утилізаційних витрат	Підтримує довгострокове інвестиційне рішення	Може ігнорувати соціальні та екологічні ефекти без додаткових параметрів
Цифровий реєстр рішень	Фіксація відповідальності, погоджень, змін і доказів виконання	Забезпечує простежуваність і контроль	Потребує регламенту прав доступу і дисципліни оновлення

Джерело: узагальнено автором на основі [4–5; 15; 35; 55–58; 60–63].

Інструменти окремо не забезпечують повноти аналізу, тому методика має поєднувати оцінювання впливу й салієнтності, мережеві та ціннісні зв'язки, LCA, LCC і цифрову простежуваність рішень. Послідовність ідентифікації, оцінювання, залучення та повторного моніторингу заінтересованих сторін представлено на рис. 1.4. Запропонований підхід переводить управління заінтересованими сторонами від разового картування до циклічної процедури, у якій зміна ролей, впливу та вимог коригує спосіб залучення учасників і розподіл відповідальності.

Екологічна, соціальна та управлінська відповідальність у будівництві не повинна зводитися до підготовки звітності після завершення фінансового року або після реалізації проєкту. Її управлінська природа полягає у включенні відповідних показників у сам процес прийняття рішень: вибір ділянки, матеріалів, технологій, контрактної моделі, схеми постачання, режиму експлуатації, плану ремонту, сценарію демонтажу та повторного використання ресурсів. Європейська таксономія сталих видів діяльності встановлює умови, за яких економічна діяльність може вважатися екологічно сталою, включно з вимогою істотного внеску в одну з екологічних цілей, відсутності значної шкоди іншим цілям, дотримання мінімальних соціальних гарантій і відповідності технічним критеріям [16]. Директива щодо корпоративної звітності зі сталого розвитку та Європейські стандарти звітності посилюють вимоги до якості, порівнянності та перевірюваності інформації про впливи підприємств [17; 59]. Світові стандарти звітності про сталість також акцентують на розкритті впливів перед стейкхолдерами, матеріальності тем і прозорості управлінських підходів [64].

Для будівельних підприємств це створює подвійну методологічну вимогу. З одного боку, необхідно формувати систему показників, що відображає екологічні, соціальні та управлінські наслідки конкретного проєкту. З іншого боку, необхідно визначати, яка сторона відповідає за створення, перевірку, оновлення і використання відповідних даних.



Рис. 1.4. Науково-методологічний підхід до ідентифікації та оцінювання заінтересованих сторін будівельних підприємств у проєктах біосферосумісного будівництва

Джерело: розроблено автором.

Наприклад, вуглецевий слід матеріалів залежить від постачальника, але використовується проєктувальником і підтверджується підрядником; енергоефективність об'єкта формується на етапі проєктування, але проявляється в експлуатації; соціальна прийнятність залежить від комунікації з громадою, але впливає на ризик затримок і репутаційні втрати інвестора.

Звітні рамки Міжнародної ради зі стандартів сталості, зокрема загальні вимоги до розкриття фінансово значущої інформації про сталість і вимоги щодо кліматичних розкриттів, посилюють зв'язок між нефінансовими впливами та економічними рішеннями інвесторів [65–66]. Галузеві стандарти для власників, девелоперів та інвестиційних трастів нерухомості деталізують питання енергоефективності, управління водою, адаптації до кліматичних ризиків, безпеки і прозорості активів [67]. Отже, будівельні підприємства мають розглядати показники відповідальності не як зовнішню вимогу, а як частину економіко-цифрової моделі управління активами, ризиками і довірою.

Розподіл екологічних, соціальних та управлінських параметрів і відповідальності за фазами життєвого циклу проєкту наведено в табл. 1.15.

Розподіл параметрів за фазами підтверджує наскрізний характер відповідальності: результати експлуатації та завершення життєвого циклу визначаються рішеннями, прийнятими ще під час ініціювання, проєктування й закупівель.

Цифрова трансформація створює передумови для переходу від декларативної взаємодії до доказового управління стейкхолдерами. Спільне середовище даних дає змогу фіксувати актуальну документацію, інформаційні моделі, рішення, коментарі, статуси погодження і відповідальних осіб. Відкриті стандарти інформаційного моделювання забезпечують сумісність даних між учасниками [10–11]. Українська Концепція впровадження технологій інформаційного моделювання будівель підкреслює потребу формування нормативної, організаційної та професійної основи для цифрового управління будівельними процесами [18].

Таблиця 1.15

**Інтеграція показників відповідальності у життєвий цикл
біосферосумісного будівельного проєкту**

Фаза життєвого циклу	Екологічні параметри	Соціальні параметри	Управлінські параметри	Відповідальні сторони
Ініціювання та обґрунтування	Вибір ділянки, попередня оцінка впливів, кліматичні ризики	Потреби громади, доступність, вплив на локальну інфраструктуру	Прозорість цілей, інвестиційні критерії, вимоги до даних	Замовник, інвестор, органи влади, громада
Проектування	Енергоефективність, матеріали, вуглецевий слід, сценарії повторного використання	Безпека, комфорт, інклюзивність, якість середовища	Погодження рішень, контроль версій, відповідальність за інформацію	Проектувальники, консультанти, замовник, оператор
Закупівлі та постачання	Походження матеріалів, екологічні декларації, логістичний слід	Умови праці в ланцюгах постачання, доброчесність контрагентів	Критерії відбору постачальників, перевірка сертифікатів	Постачальники, підрядники, служба закупівель, аудитор
Будівництво	Відходи, енергоспоживання, шум, пил, використання води	Безпека працівників, вплив на мешканців, комунікація зі скаргами	Контроль виконання, журнал змін, доказовість робіт	Генпідрядник, субпідрядники, технічний нагляд, громада
Експлуатація	Фактичне енергоспоживання, вода, ремонтпридатність, адаптивність	Комфорт користувачів, безпека, доступність	Цифровий паспорт активу, моніторинг показників, план технічного обслуговування	Оператор, власник, користувачі, сервісні організації
Реновація або демонтаж	Повторне використання матеріалів, мінімізація відходів, утилізація	Безпека робіт, вплив на територію, збереження суспільної цінності	Документування матеріальних потоків, звітність, контроль підрядників	Власник, оператор, підрядники демонтажу, органи влади

Джерело: узагальнено автором на основі [14–17; 35; 52; 59–60; 64–67].

Проте цифрова прозорість не виникає автоматично. Вона потребує інституційного контуру: правил доступу, вимог до якості даних, визначення власників інформації, відповідальності за оновлення, порядку верифікації та процедур вирішення спорів. Якщо дані не мають власника або не пов'язані з контрактними зобов'язаннями, вони не можуть бути основою відповідального

управління. Тому екосистема стейкхолдерів має бути описана не тільки організаційною схемою, а й інформаційною матрицею відповідальності: хто створює дані, хто їх перевіряє, хто використовує для рішення, хто несе ризик помилки, хто має право доступу.

Інтегрована реалізація проєктів є важливим організаційним механізмом подолання фрагментації будівництва. У таких моделях учасники залучаються раніше, ризики і вигоди розподіляються прозоріше, а рішення приймаються на основі спільної інформації [61]. Для біосферосумісного будівництва це має особливе значення, оскільки більшість екологічних і соціальних наслідків визначається ще до початку будівельних робіт. Раннє залучення підрядників, постачальників і операторів дозволяє врахувати технологічність, походження матеріалів, можливість повторного використання, ремонтпридатність і експлуатаційні витрати.

Український контекст додає до цієї проблематики вимір відновлення. Післявоєнна модернізація інфраструктури потребує не тільки швидкості, а й доказовості рішень, прозорості використання коштів, відповідності європейським стандартам і здатності демонструвати довгострокову цінність активів. Матеріали щодо цифрової трансформації українських будівельних підприємств показують наявність бар'єрів у вартості, компетенціях, стандартах, сумісності програм і структурі управління [19–21]. Отже, управління стейкхолдерами має бути поєднане з розвитком цифрових компетенцій, процедур відкритого обміну даними, уніфікованих вимог до інформаційних моделей і зрозумілих правил публічного звітування.

Цифрово-інституційні механізми управління екосистемою підприємств-стейкхолдерів та склад необхідних доказових даних систематизовано в табл. 1.16.

Поєднання цифрових моделей, реєстрів, паспортів і матриць відповідальності переводить взаємодію учасників у доказову площину та зменшує інформаційну асиметрію, спори й ризик непідтверджених рішень.

Узагальнення теоретичних підходів, галузевих досліджень і нормативних вимог дало змогу сформулювати модель динамічного управління екосистемою підприємств-стейкхолдерів проєктів біосферосумісного будівництва [257]. Її зміст утворюють взаємопов'язані контури ідентифікації учасників, узгодження інтересів, спільного прийняття рішень, цифрової доказовості та оцінювання життєвого циклу. На відміну від статичного переліку заінтересованих сторін, модель передбачає регулярне оновлення ролей, значущості, інформаційних повноважень і відповідальності учасників відповідно до фази проєкту, а також розподіл ресурсів, даних, знань, ризиків і часток спільно створюваної цінності.

Таблиця 1.16

Цифрово-інституційні механізми управління екосистемою підприємств-стейкхолдерів

Механізм	Управлінська функція	Очікуваний результат
Спільне середовище даних	Узгодження документації, моделей, рішень і статусів	Зменшення інформаційних втрат і спорів щодо актуальності даних
Інформаційна модель об'єкта	Поєднання технічних, економічних і експлуатаційних характеристик	Прозоре планування вартості, строків, ресурсів і впливів
Цифровий реєстр рішень	Фіксація підстав і наслідків управлінських рішень	Підзвітність і простежуваність відповідальності
Паспорти матеріалів	Контроль походження, складу, повторного використання та вуглецевого сліду	Доказовість циркулярності та ресурсної ефективності
Матриця інформаційної відповідальності	Розподіл ролей у створенні, перевірці й використанні даних	Зменшення невизначеності у взаємодії сторін
Звітність щодо впливів	Публічне розкриття економічних, екологічних, соціальних і управлінських результатів	Підвищення довіри інвесторів, громад і регуляторів

Джерело: узагальнено автором на основі [8; 10–11; 16–21; 59; 61; 64–67].

Контур ідентифікації забезпечує повне виявлення підприємств-стейкхолдерів та інших учасників, їхніх ролей, ресурсів, директивних параметрів, інформаційних прав і ризиків. Контур узгодження інтересів перетворює різноспрямовані очікування на систему цільових параметрів проєкту. Контур спільного прийняття рішень визначає склад учасників для вибору матеріалів, технологій, контрактної моделі, варіантів проєктування і

плану виконання. Контур цифрової доказовості фіксує дані, версії, рішення, відповідальних осіб і підтвердження виконання. Контур оцінювання життєвого циклу переводить внески та наслідки у вимірювані результати, що стають підставою для перерозподілу ризиків, відповідальності й часток спільно створюваної цінності.

Наукова відмінність моделі полягає у трактуванні підприємства-стейкхолдера не лише як носія інтересу або договірної функції, а як носія ресурсів, даних, знань, директивних параметрів проєкту, відповідальності, легітимності та частини спільно створюваної цінності. Відповідно управління екосистемою виходить за межі комунікаційного супроводу й охоплює цифрову матрицю відповідальності, правила спільного управління ризиками, систему показників життєвого циклу та механізми розподілу результатів між учасниками.

Запропонована модель також дозволяє подолати методологічний розрив між теорією стейкхолдерів, сталим розвитком, цифровою трансформацією та проєктним управлінням. Теорія стейкхолдерів пояснює, кого і чому потрібно залучати. Сталий розвиток визначає, які наслідки мають оцінюватися. Проєктне управління задає процедурну логіку планування, виконання і контролю. Цифрова трансформація забезпечує дані, простежуваність і доказовість. Біосферосумісне будівництво поєднує ці підходи в єдину систему, орієнтовану на довгострокову цінність активу, мінімізацію негативних впливів і підвищення довіри між учасниками. Контури науково-методологічної моделі управління екосистемою, відповідні управлінські дії та показники результативності наведено в табл. 1.17.

П'ять контурів формують замкнений механізм управління, у якому ідентифікація та узгодження учасників завершуються вимірюванням життєвоциклових результатів і коригуванням взаємодії. Для українських будівельних підприємств управління екосистемою стейкхолдерів має особливе значення через поєднання завдань відновлення, європейської

інтеграції, цифрової модернізації та потреби у зміцненні довіри до будівельних проєктів.

Таблиця 1.17

Контури науково-методологічної моделі управління екосистемою підприємств-стейкхолдерів

Контур моделі	Обґрунтування	Управлінські дії	Показники результативності
Ідентифікація сторін	Теорія стейкхолдерів і модель салієнтності	Реєстр сторін, аналіз інтересів, ресурсів, впливу і терміновості	Повнота карти сторін, кількість неідентифікованих ризиків, своєчасність оновлення реєстру
Узгодження інтересів	Мережевий і ціннісно-орієнтований підходи	Переговори, встановлення цільових параметрів, баланс вартості, строків і впливів	Рівень погодження цілей, кількість конфліктів, зміни вимог після затвердження
Спільне прийняття рішень	Проєктне управління та інтегрована реалізація проєктів	Раннє залучення підрядників, постачальників, операторів і громад	Швидкість погодження, частка рішень з участю відповідальних сторін, зменшення переробок
Цифрова доказовість	Онтологічна архітектура даних, інформаційне моделювання і спільне середовище	Фіксація даних, відповідальності, версій, рішень і підтверджень	Простежуваність рішень, кількість інформаційних помилок, своєчасність оновлення даних
Оцінювання життєвого циклу	Сталий розвиток, циркулярна економіка, відповідальна звітність	Оцінка вартості володіння, ресурсних потоків, вуглецевого сліду, соціальних ефектів	Вартість життєвого циклу, енергоспоживання, повторне використання матеріалів, довіра громади

Джерело: розроблено автором на основі [3–5; 16–17; 23; 35; 53–68].

Повоєнне відновлення створює попит на швидкі рішення, але надмірне прискорення без якісної координації може відтворити старі проблеми: фрагментацію відповідальності, низьку прозорість, слабе врахування експлуатаційних витрат, обмежену участь громад і недостатню доказовість екологічних характеристик. Тому застосування екосистемної моделі має бути спрямоване не на ускладнення процедур, а на зменшення помилок, конфліктів і втрат протягом життєвого циклу.

Практичне впровадження моделі доцільно здійснювати поетапно. На першому етапі підприємство формує реєстр стейкхолдерів для типових

проектів і визначає їхні ролі за фазами життєвого циклу. На другому розробляється матриця інформаційної відповідальності, у якій фіксується, хто створює, перевіряє, погоджує та використовує дані щодо вартості, строків, матеріалів, ризиків, екологічних і соціальних параметрів. На третьому матриця інтегрується зі спільним середовищем даних та інформаційною моделлю об'єкта. На четвертому запроваджується набір показників життєвого циклу і правила розподілу результатів. На п'ятому результати використовуються у звітності, аудиті, переговорах з інвесторами та комунікації з громадами. Динамічну матрицю ролей підприємств-стейкхолдерів за фазами життєвого циклу наведено в додатку В.

Українські дослідження підтверджують потребу в такому переході. М. Бублик та співавтори показують доцільність використання нечіткої логіки та кластерного аналізу для оцінювання циркулярної трансформації економіки [69]. А. Ковальовська і С. Зеленський аналізують моделі оцінки стейкхолдерів у стратегіях сталого розвитку міст, що є релевантним для муніципального і девелоперського рівнів [70]. О. Чигрин, Т. Пімененко, О. Люльов та А. Гончарова розглядають зелені облігації як інструмент стимулювання чистішого виробництва на державному і корпоративному рівнях [71]. Ці праці демонструють, що екосистемне управління в Україні має розвиватися не лише у площині комунікацій, а й у площині фінансових інструментів, циркулярності, міського розвитку та довіри до інституційних механізмів.

Запропонована логіка створює основу для подальшого обґрунтування стійкості підприємств, корпоративної культури, критеріїв оцінювання, інституційних вимог, розподілу ризиків і цифрового інструментарію. Сформовані положення забезпечують послідовний перехід від теоретико-методологічного осмислення екосистемної взаємодії до її формалізації, оцінювання та практичної апробації.

Отже, управління екосистемою стейкхолдерів проектів біосферосумісного будівництва має розглядатися як самостійна теоретико-методологічна основа економіко-цифрових моделей управління будівельними

підприємствами. Його зміст полягає не лише у комунікації з учасниками проєкту, а у формуванні системи спільної відповідальності, узгодження інтересів, розподілу ризиків, цифрової доказовості та оцінювання результатів життєвого циклу.

Проведений теоретичний, онтологічний і стейкхолдерсько-екосистемний аналіз засвідчив, що формування економіко-цифрових моделей потребує інтеграції положень, які в науковому дискурсі переважно розвиваються відокремлено. Цифровізація без економічної діагностики не дає змоги оцінити управлінський ефект; біосферосумісність без життєвоциклових даних залишається декларативною; стейкхолдерська взаємодія без розподілу відповідальності та ризиків не забезпечує керованості; прогнозування без інтерпретації не перетворюється на коригувальне рішення.

Для подолання цього методологічного розриву обґрунтовано концептуально-онтологічну платформу формування економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва. Платформа встановлює причинно-логічні переходи між інституційними вимогами, проєктними даними, поведінкою учасників, результатами оцінювання та управлінським коригуванням, унаслідок чого цифрові, економічні, екологічні, стейкхолдерські й ризикові параметри набувають єдиної методологічної організації.

Одержані результати інтегровано в концептуально-онтологічну платформу формування економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва. Платформа поєднує шість функціонально взаємопов'язаних контурів: еволюційно-онтологічний, інституційний, стейкхолдерсько-екосистемний, стійкісно-культурний, оцінювальний та інструментально-цифровий. Інституційний контур трансформує ESG-принципи, корпоративну соціальну відповідальність, нормативні вимоги й стандарти у розподіл відповідальності, вимоги до якості даних і процедури цифрового підтвердження. Взаємодія контурів утворює замкнений цикл, у якому результати оцінювання,

сценарного прогнозування та інтелектуальної підтримки рішень повертаються до системи управління через моніторинг, зворотний зв'язок і адаптивне коригування; концептуальну логіку платформи подано на рис. 1.5.

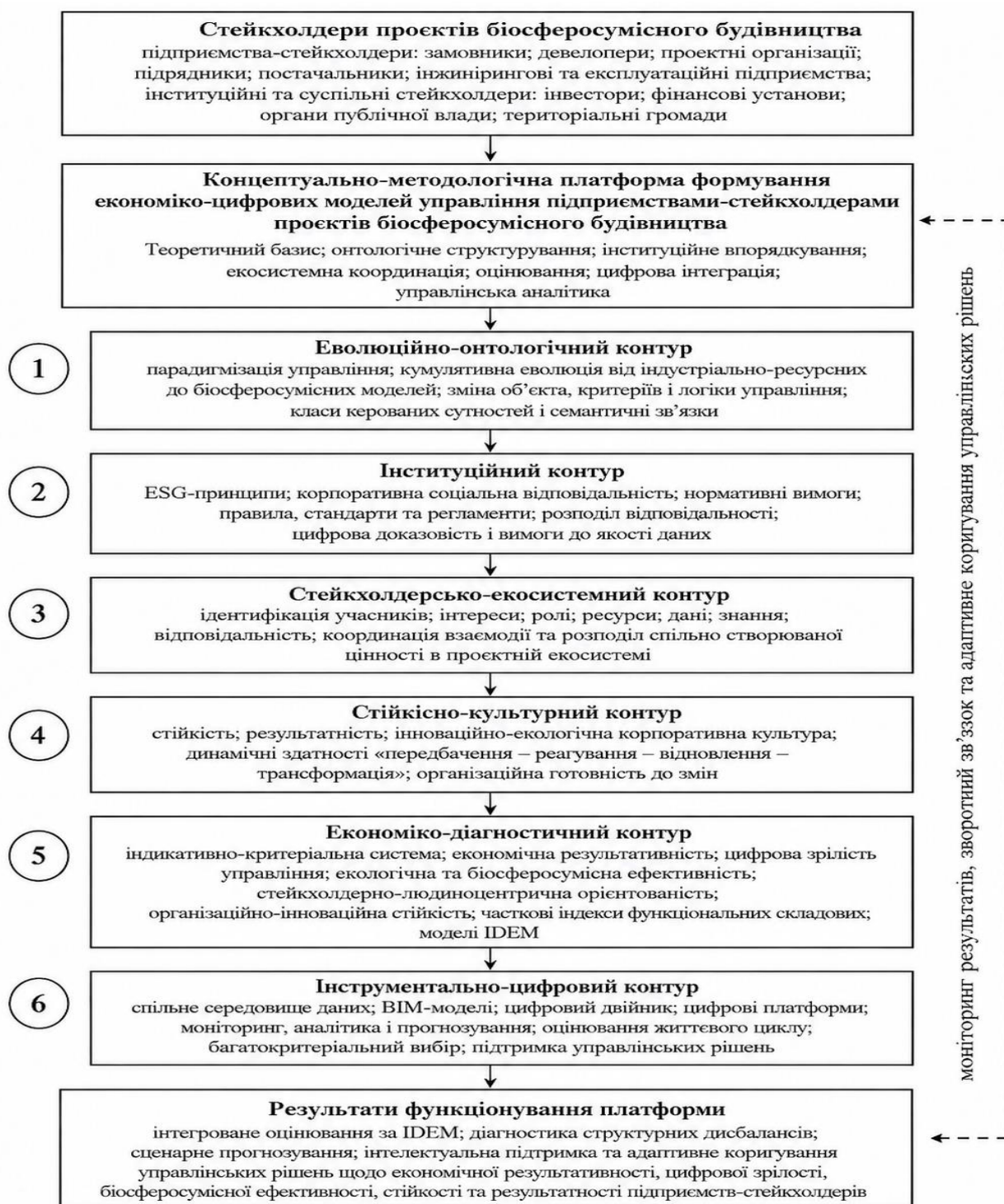


Рис. 1.5. Концептуально-онтологічна платформа формування економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва

Джерело: розроблено автором.

Платформа поєднує шість методологічних контурів у замкнений процесний цикл та визначає логіку подальшої операціоналізації IDEM через індикатори, оцінювання, прогнозування й адресне управлінське коригування.

Структурну основу платформи формують шість взаємопов'язаних контурів. Еволюційно-онтологічний контур визначає закономірності парадигмізації, межі предмета управління, сім класів керованих сутностей і семантичні зв'язки між ними. Стейкхолдерсько-екосистемний контур формалізує динамічні ролі учасників, їхні інтереси, ресурси, дані, знання, ризики, відповідальність і частки спільно створюваної цінності.

Економіко-діагностичний контур забезпечує операціоналізацію різномірних параметрів через індикативну систему, нормування, функціональні підсистеми. Аналітично-інтерпретаційний контур перетворює отримані значення на структурну діагностику, сценарні прогнози, пояснення причин дисбалансів і адресні управлінські висновки.

Інструментально-цифровий контур поєднує спільне середовище даних, BIM, цифрові двійники, цифрові платформи, засоби моніторингу, аналітики та підтримки рішень. Ризико-орієнтований контур трансформує інституційні й ESG-вимоги у реєстри ризиків, порогові обмеження, розподілену відповідальність, контрольні дії та процедури адаптивного коригування.

Взаємодія контурів організована у замкнений процесний цикл «вимоги та цілі – взаємодія та дані – оцінювання і прогнозування – управлінське коригування». Запропонована платформа визначає послідовність перетворення вимоги на правило, правила – на дані та відповідальність, даних – на оцінку і прогноз, а оцінки – на коригувальне рішення.

Функціонування платформи забезпечує семантичне узгодження фізичних і цифрових активів, процесів, ресурсів, правил, показників та відповідальності учасників. Сформована конструкція створює методологічне підґрунтя для переходу від фрагментарного використання цифрових технологій до адаптивного управління проєктною екосистемою, у якому економічна результативність, цифрова зрілість, біосферосумісна

ефективність, стійкість і резильєнтність підприємств оцінюються, прогнозуються та коригуються у взаємозв'язку з інституційними вимогами, цифровою доказовістю і спільно створюваною цінністю (табл. 1.18).

Таблиця 1.18

Методологічні функції контурів концептуально-онтологічної платформи

Контур	Методологічне призначення	Основні категорії та процедури	Прикладне застосування
Еволюційно-онтологічний	Визначення логіки еволюції управлінських моделей та предметної структури економіко-цифрового управління	Парадигмізація; класифікованих сутностей; семантичні зв'язки; життєвий цикл; онтологічне структурування	Формування понятійно-категоріального базису, онтологічної схеми та структури даних управління
Інституційний	Формування нормативно-регуляторних меж, правил відповідальності та механізмів управління ризиками в економіко-цифровій взаємодії	ESG-принципи; корпоративна соціальна відповідальність; нормативні вимоги; стандарти й регламенти; реєстр ризиків; розподіл відповідальності; цифрова доказовість; якість даних	Узгодження нормативних вимог, алокація ризиків і відповідальності, формування контрольних обмежень та процедур адаптивного реагування
Стейкхолдерсько-екосистемний	Узгодження ролей, інтересів, ресурсів і внесків учасників у межах проєктної екосистеми	Стейкхолдери; ролі; інтереси; ресурси; дані; знання; відповідальність; координація; спільно створювана цінність	Формування реєстру учасників, матриць ролей і взаємодії, механізмів узгодження інтересів та спільного прийняття рішень
Стійкісно-культурний	Формування організаційної здатності підприємств до передбачення, реагування, відновлення й трансформації в умовах змін	Стійкість; резильєнтність; інноваційно-екологічна корпоративна культура; цифрові компетентності; культура даних; динамічні здатності; організаційна готовність	Розвиток адаптивності, інноваційної готовності, цифрових компетентностей і корпоративних механізмів підтримання стійкості
Економіко-діагностичний	Перетворення різномірних параметрів економіко-цифрового управління на зіставні оцінки, діагностика структурних дисбалансів і прогнозування управлінських станів	Система In1–In20; нормування; часткові індекси функціональних складових; нечітка логіка; модель IDEM; аналіз чутливості; сценарне моделювання; нейромережева апроксимація	Інтегральне оцінювання, визначення директивних рівнів, виявлення обмежувальної складової, сценарне прогнозування та обґрунтування адресних управлінських дій
Інструментально-цифровий	Цифрове забезпечення збору, інтеграції, простежуваності, аналітики та використання даних у процесах управління	CDE; BIM; цифровий двійник; ERP; цифрові платформи; моніторинг; аналітика; прогнозування; оцінювання життєвого циклу	Формування цифрової доказовості, інтеграція процесів і даних, моніторинг стану об'єкта та підтримка управлінських рішень

Джерело: розроблено автором.

Інтеграція шести контурів забезпечує причинно-логічний зв'язок між вимогами, даними, поведінкою учасників, оцінюванням, прогнозуванням і коригувальними рішеннями, формуючи методологічну основу моделі IDEM.

Для переведення концептуально-онтологічної платформи з рівня загальної архітектури на рівень послідовної реалізації здійснено декомпозицію кожного контуру за стратегічними й операційними цілями, дослідницькими завданнями, інструментами та вимірюваними результатами. Така декомпозиція встановлює відповідність між теоретичними положеннями, методами їх операціоналізації та функціональними результатами економіко-цифрового управління. Структурно-логічну модель реалізації контурів платформи наведено на рис. 1.6. Модель відображає вертикальну логіку реалізації платформи: «контур – стратегічна ціль – операційні цілі – завдання – інструменти реалізації – показники оцінювання – інтегральний результат». Така послідовність не допускає відриву методологічного положення від способу його практичного втілення. Кожний контур отримує власну цільову орієнтацію, конкретизується через операційні дії, забезпечується відповідним інструментарієм і завершується формуванням даних, придатних для оцінювання в моделі управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва.

Еволюційно-онтологічний контур формує вихідну предметну площину платформи. Його стратегічною ціллю є онтологічна трансформація об'єкта управління: будівельне підприємство розглядається не як відносно замкнена виробнича одиниця, а як відкрита економіко-цифрова система, включена до життєвого циклу будівельного активу та мережі міжорганізаційних взаємодій. Операційний зміст контуру охоплює уточнення меж об'єкта управління, інтеграцію життєвоциклової логіки та формування понятійної основи економіко-цифрового управління. Методологічним результатом стає узгоджена система категорій, у якій фізичні й цифрові активи, процеси, учасники, ресурси, правила та показники описуються як взаємопов'язані керовані сутності

Контури платформи					
1. Еволюційно-онтологічний	2. Інституційний	3. Стейкхолдерсько-екосистемний	4. Стійкісно-культурний	5. Економіко-діагностичний	6. Інструментально-цифровий
Стратегічні цілі					
1. Онтологічна трансформація об'єкта управління	2. Інституційне впорядкування економіко-цифрового управління	3. Формування стейкхолдерсько-екосистемної архітектури управління	4. Забезпечення організаційної стійкості та культурної цифрової трансформації	5. Побудова економіко-діагностичної системи оцінювання та прогнозування	6. Розвиток інструментально-цифрової основи управління
Операційні цілі					
1.1. Уточнення змісту об'єкта 1.2. Інтеграція життєвого циклу 1.3. Формування понятійної основи	2.1. ESG-принципи 2.2. Нормативні вимоги 2.3. Розподіл відповідальності 2.4. Цифрова лояльність і якість даних	3.1. Ідентифікація стейкхолдерів 3.2. Цифровий реєстр 3.3. Матриця взаємодії 3.4. Узгодження інтересів	4.1. Цифрові компетентності 4.2. Культура даних 4.3. Управління змінами 4.4. ESG-відповідальність	5.1. Модель IDEM 5.2. Система показників 5.3. Нечітка логіка 5.4. Сценарне моделювання	6.1. Цифрова архітектура 6.2. Інтеграція процесів 6.3. Автоматизація контролю 6.4. Підтримка рішень
Завдання					
1.1.1–1.1.3 1.2.1–1.2.3 1.3.1–1.3.3	2.1.1–2.1.3 2.2.1–2.2.3 2.3.1–2.3.3 2.4.1–2.4.3	3.1.1–3.1.3 3.2.1–3.2.3 3.3.1–3.3.4 3.4.1–3.4.4	4.1.1–4.1.3 4.2.1–4.2.3 4.3.1–4.3.3 4.4.1–4.4.5	5.1.1–5.1.3 5.2.1–5.2.3 5.3.1–5.3.3 5.4.1–5.4.4	6.1.1–6.1.3 6.2.1–6.2.3 6.3.1–6.3.3 6.4.1–6.4.3
Інструменти реалізації					
Онтологічно-категоріальні тезаурус понять; класи сутностей; мапа життєвого циклу; семантичні зв'язки; онтологічна схема	Інституційні реєстр нормативних вимог; матриця відповідальності; стандарти ISO та ESG; регламенти даних; сценарії реагування; цифрова лояльність	Стейкхолдерсько-екосистемні карта стейкхолдерів; цифровий реєстр; матриця взаємодії; матриця ролей і відповідальності; механізм узгодження інтересів	Стійкісно-культурні матриці цифрових компетентностей; програми навчання; культура даних; ESG-цінності; механізми реагування; відновлення і трансформації	Економіко-діагностичні система показників In1–In20; нормалізація; нечіткої індексні функціональних складових; нечіткі правила Мамдані; аналіз чутливості; сценарне моделювання; нейромережева апроксимація; модель IDEM	Інструментально-цифрові BIM; CDE; ERP; CRM; GIS; IoT; Digital Twin; Big Data; AI; дашборди; моніторинг; підтримка рішень
Ключові показники оцінювання					
Економічна результативність підприємства In1–In4	Цифрова зрілість управління In5–In8	Екологічна та біосферосумісна ефективність In9–In12	Стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість In13–In16	Організаційно-інноваційна стійкість In17–In20	
IDEM — нечітко-логічна модель інтегрального оцінювання ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами в умовах біосферосумісного розвитку					

Рис. 1.6. Структурно-логічна модель реалізації концептуально-онтологічної платформи формування економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва

Джерело: розроблено автором.

Інституційний контур задає нормативно-регуляторні межі платформи та формалізує правила відповідальності, доказовості й роботи з ризиками. Його стратегічна ціль полягає в інституційному впорядкуванні економіко-цифрового управління. Операційні цілі охоплюють ESG-принципи, нормативні вимоги, розподіл відповідальності, цифрову доказовість і якість даних. Інструментальну основу становлять реєстр нормативних вимог, матриці відповідності ДБН, EN, ISO та ESG, процедури оцінювання впливу на довкілля, регламенти управління відходами, стандарти ISO 9001, ISO 14001, ISO 31000, ISO 19650 і сценарії реагування. Контур перетворює зовнішню вимогу на внутрішнє правило, відповідального суб'єкта, цифровий доказ, контрольне обмеження та коригувальну дію.

Стейкхолдерсько-екосистемний контур визначає суб'єктну архітектуру платформи. Його стратегічна ціль полягає у формуванні стейкхолдерсько-екосистемної архітектури управління за фазами життєвого циклу. Операційні цілі охоплюють ідентифікацію стейкхолдерів, створення цифрового реєстру, побудову матриць взаємодії та узгодження інтересів. Інструментальне забезпечення утворюють карта стейкхолдерів, матриці «влада – інтерес», «вплив – відповідальність», «ризик – стейкхолдер», RACI, комунікаційний регламент і механізм погодження рішень [173]. У результаті ресурси, дані, знання, легітимність і відповідальність учасників інтегруються в керовану конфігурацію спільного створення цінності [251].

Стійкісно-культурний контур відображає здатність підприємства підтримувати функціональну цілісність та здійснювати цифрові, екологічні й організаційні трансформації. Його стратегічна ціль полягає у забезпеченні організаційної стійкості та формуванні культури цифрової трансформації. Операціоналізація передбачає розвиток цифрових компетентностей, культури даних, управління змінами та ESG-відповідальності. Матриця цифрових компетентностей, програми навчання, регламенти врядування даними, механізми подолання опору, організаційне навчання й культура безпеки перетворюють формальні вимоги на сталі практики. Контур формує

резильєнтність через здатність передбачати збурення, реагувати, відновлювати функціональність, реконфігурувати ресурси та закріплювати зміни.

Економіко-діагностичний контур перетворює параметри управління на зіставні оцінки та діагностично-прогностичні сигнали. Його стратегічна ціль полягає у побудові економіко-діагностичної системи оцінювання та прогнозування. Операційний рівень поєднує модель IDEM, систему показників In1–In20, нечітко-логічне виведення і сценарне моделювання. Нормалізація, часткові індекси функціональних складових, аналіз чутливості та нейромережева апроксимація дають змогу виявляти структурні дисбаланси, визначати обмежувальні складові й формувати управлінські дії. Контур повертає діагностичний сигнал для коригування цілей, ресурсів, правил, відповідальності й інструментів.

Інструментально-цифровий контур забезпечує технологічне втілення платформи та інтеграцію даних між її складовими. Його стратегічна ціль полягає у розвитку інструментально-цифрової основи управління, що забезпечує цифрову архітектуру, інтеграцію процесів, автоматизацію контролю і підтримку рішень. BIM, ERP, CRM, CDE, IoT, цифровий двійник, великі дані, штучний інтелект, геоінформаційні системи, цифрові панелі та системи підтримки рішень поєднують проєктні, фінансові, ресурсні, ризикові, екологічні й експлуатаційні дані. Управлінська цінність інструментів визначається їх спроможністю забезпечувати простежуваний ланцюг від стратегічної цілі й показника до джерела даних, рішення та верифікації результату [255].

Система функціональних результатів у нижній частині моделі відображає вимірюваний вихід платформи за п'ятьма взаємопов'язаними складовими: економічною результативністю підприємства, цифровою зрілістю управління, екологічною та біосферосумісною ефективністю, стейкхолдерно-людиноцентричною орієнтованістю й організаційно-інноваційною стійкістю. Їх сукупне оцінювання має враховувати

взаємозалежність економічних, цифрових, екологічних, соціальних та організаційних параметрів, а також наявність критичних обмежень, які не можуть бути компенсовані високими значеннями інших складових. Подальша формалізація цих результатів забезпечує перехід від концептуальної архітекτονіки платформи до індикативного оцінювання, прогнозування та обґрунтування управлінських коригувань. Методологічна цінність структурно-логічної моделі полягає у встановленні трасованості між науковою концепцією та процедурою її практичного застосування. За кожною стратегічною ціллю закріплюються операційні цілі, завдання, методи, власники даних, цифрові джерела, інструменти й показники результативності. Така організація дає змогу використовувати платформу як рамку проєктування системи управління, проведення організаційного аудиту, формування інформаційних вимог, розподілу відповідальності та вибору цифрових рішень.

Практичне застосування моделі передбачає послідовне визначення проблемного контуру підприємства, уточнення відповідної стратегічної цілі, декомпозицію її на операційні завдання, добір інструментів реалізації та встановлення показників перевірки. Отримані значення інтегральних індексів формують компонентний профіль функціональних підсистем, за яким виявляється обмежувальна складова, оцінюються сценарії зміни й обґрунтовуються адресні управлінські дії. Унаслідок цього платформа забезпечує не лише опис економіко-цифрового управління, а й замкнений цикл його діагностики, прогнозування та адаптивного коригування.

У додатку А табл. А.1 надано розгорнуту матрицю стратегічних та операційних орієнтирів концептуально-онтологічної платформи, яка деталізує зміст рисунка 1.6 і забезпечує його методичну інтерпретацію. Для кожного контуру визначено відповідний стратегічний орієнтир, сукупність операційних завдань та очікуваний управлінський результат. Матриця розкриває послідовність переходу від онтологічної трансформації об'єкта управління, формування стейкхолдерсько-екосистемної взаємодії,

забезпечення біосферосумісної результативності, цифрової інтеграції й організаційної стійкості до побудови оцінювально-прогностичної системи.

Отже, структурно-логічна модель реалізації платформи формує єдиний механізм, у якому онтологічна трансформація об'єкта управління, екосистемна координація учасників, організаційна стійкість, інституційно-ризикова відповідність, цифрове забезпечення та оцінювально-прогностична аналітика не функціонують відокремлено. Їх взаємодія забезпечує перехід від вимог і цілей до даних, оцінювання, прогнозу та управлінського коригування.

Висновки до розділу 1

1. Розкрито закономірності парадигмізації управління підприємствами-стейкхолдерами та доведено кумулятивний характер переходу від індустріально-ресурсної до проєктно-процесної, цифрово-інтеграційної, стейкхолдерсько-екосистемної та біосферосумісної економіко-цифрової моделей. Кожний наступний етап не витісняє попередній, а розширює склад об'єктів управління, критерії результативності й механізми координації: від ресурсів, робіт і виробничої дисципліни – до процесів, даних, мережевих взаємозалежностей, ризиків та життєвоциклової цінності.

2. Уточнено зміст поняття «підприємство-стейкхолдер проєкту біосферосумісного будівництва» як суб'єкта господарювання, який виконує змінну функціональну роль у проєктній екосистемі, залучає ресурси, створює та використовує дані і знання, приймає ризики й відповідальність, впливає на директивні параметри проєкту та бере участь у розподілі спільно створюваної економічної, екологічної, соціальної й управлінської цінності.

3. Набули подальшого розвитку концептуальні засади біосферосумісної стейкхолдерсько орієнтованої економіко-цифрової моделі управління. Її визначено як інтегровану систему принципів, цифрових даних, процедур, правил і показників, за допомогою якої підприємство планує, координує, контролює та коригує створення будівельної цінності впродовж життєвого

циклу активу з урахуванням економічної результативності, цифрової доказовості, біосферних обмежень, соціальної легітимності та довгострокової відповідальності.

4. Удосконалено онтологічну архітектуру економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами. У її межах виокремлено сім класів керованих сутностей – фізичний актив, цифровий актив, процес, учасник, ресурс, правило та інтегрований показник – і встановлено їхній зв'язок з онтологічно-категоріальним, семантико-інформаційним, процесно-орієнтованим, аналітико-прогнозним, економіко-ціннісним та проєктно-інтегрованим контуром врядування даними й довіри. Запропоноване поєднання забезпечує семантичну узгодженість даних і простежуваність переходу від цифрового об'єкта до управлінського рішення та вимірюваного результату.

5. Удосконалено модель динамічного управління екосистемою підприємств-стейкхолдерів через поєднання контурів ідентифікації учасників, узгодження інтересів, спільного прийняття рішень, цифрової доказовості та оцінювання життєвого циклу. Модель враховує зміну ролей і значущості учасників за фазами проєкту та формує підґрунтя координації їхніх внесків, спільного управління ризиками, розподілу відповідальності й результатів проєкту.

6. Розроблено концептуально-онтологічну платформу побудови економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва, у межах якої еволюційно-онтологічний, стейкхолдерсько-екосистемний, економіко-діагностичний, аналітично-інтерпретаційний, інструментально-цифровий і ризик-орієнтований контури поєднано в єдину циклічну послідовність «вимоги та цілі – взаємодія та дані – оцінювання і прогнозування – управлінське коригування». Відмінність запропонованої платформи полягає у подоланні фрагментарного розгляду цифровізації, біосферосумісності, стійкості, ризиків і стейкхолдерської взаємодії шляхом установаження взаємозумовлених

переходів від інституційних вимог і проєктних даних до поведінки учасників, результатів оцінювання та коригувальних рішень, що створює цілісний методологічний базис для формування й узгодження рівнів моделі економіко-цифрового управління будівельними підприємствами.

7. Обґрунтовано структурно-логічну модель реалізації концептуально-онтологічної платформи формування економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва, у якій взаємозв'язок еволюційно-онтологічного, стейкхолдерсько-екосистемного, стійкісно-культурного, інституційно-ризикового, інструментально-цифрового та оцінювально-прогностичного контурів розкрито через послідовність «контур – стратегічна ціль – операційні цілі – завдання – інструменти реалізації – показники оцінювання – інтегральний результат». Запропонована декомпозиція забезпечує трасованість між теоретичними положеннями, методами їх операціоналізації та практичними процедурами управління, оскільки за кожним контуром закріплює цільову орієнтацію, інструментарій, джерела даних, відповідальність і вимірювані результати. Її практична цінність полягає у можливості виявляти проблемний контур підприємства, декомпонувати відповідну стратегічну ціль, визначати необхідні управлінські дії та формувати компонентний профіль результативності, придатний для подальшої інтегральної діагностики.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЧНИЙ БАЗИС ФОРМУВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІКО-ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВАМИ-СТЕЙКХОЛДЕРАМИ

2.1. Методологічна архітектоніка стійкості та резильєнтності підприємств-стейкхолдерів у проєктній екосистемі біосферосумісного будівництва

Формування економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва потребує попереднього встановлення тих галузевих умов, у межах яких виникають, реалізуються та коригуються управлінські рішення. Будівельне підприємство не функціонує як ізольований виробничий суб'єкт: його ресурсна конфігурація, контрактна поведінка, цифрова взаємодія та екологічні зобов'язання залежать від циклічності попиту, структури будівельної продукції, доступності капіталу, стану трудового потенціалу і фінансової спроможності сукупності учасників. Тому методологічне осмислення стійкості має виходити за межі внутрішньофірмових коефіцієнтів і включати параметри проєктної екосистеми як зовнішній контур обмежень та можливостей.

Наукова проблема полягає у невідповідності між традиційним трактуванням стійкості як здатності зберігати заданий стан і фактичними умовами функціонування будівельної галузі, для яких характерними є різкі розриви виробничої траєкторії, зміна структури попиту, територіальне звуження статистичного охоплення, дефіцит ресурсів і переорієнтація на відновлення пошкоджених активів. За таких обставин збереження попередньої конфігурації не завжди є раціональною реакцією. Управлінська спроможність виявляється у підтриманні критичних функцій, швидкому перепроєктуванні зв'язків, відновленні керованості та переході до нової структури діяльності,

сумісної з вимогами життєвого циклу, ресурсної ощадності й екологічної безпеки.

У межах цього дослідження стійкість підприємства-стейкхолдера трактується як здатність утримувати допустимі параметри економічної, організаційної, цифрової та екологічної результативності за умов зміни зовнішнього середовища [256]. Резильєнтність визначається як здатність зберігати критичні функції, поглинати наслідки шоку, відновлювати керованість і трансформувати конфігурацію ресурсів, компетентностей та міжорганізаційних зв'язків відповідно до нових параметрів проєктної екосистеми. Таке розмежування усуває ототожнення стійкості з незмінністю та надає резильєнтності операційного змісту, придатного для подальшої індикативної формалізації.

Методологічна конфігурація підрозділу поєднує теоретичне узагальнення категорій стійкості й резильєнтності, аналіз галузевих детермінант будівництва, декомпозицію внутрішніх складових підприємства та формалізацію динамічних здатностей до передбачення, реагування, реконфігурації й трансформації.

Категорія стійкості має міждисциплінарне походження. У класичній екологічній теорії К. Голлінг розмежував інженерну стійкість як швидкість повернення до рівноваги та екологічну резильєнтність як здатність системи поглинати збурення без втрати базових функцій [73]. Перенесення цієї логіки в економіку й менеджмент змінило одиницю аналізу: підприємство почало розглядатися не як статична структура, а як відкрита система, що підтримує життєздатність через адаптацію та перебудову ресурсів.

Стандарт ISO 22316 пов'язує організаційну резильєнтність зі здатністю поглинати зміни, адаптуватися до них і продовжувати досягати визначених цілей [72]. С. Дучек конкретизує цю категорію через взаємопов'язані здатності до передбачення потенційних загроз, подолання несприятливих подій і адаптації на основі набутого досвіду [74]. Для підприємств-стейкхолдерів будівельних проєктів така послідовність має розширюватися реконфігурацією

ресурсів і міжорганізаційних зв'язків, оскільки значна частина збурень виникає на межі контрактів, постачання, проєктних рішень, цифрових даних і регуляторних процедур.

Теорія динамічних здатностей вказує на те, що конкурентна життєздатність формується через уміння інтегрувати, оновлювати й перебудовувати ресурси відповідно до змін середовища [75]. У будівництві така здатність виявляється у переході від разового управління окремим проєктом до управління портфелем проєктів, даних, компетентностей, технологій і партнерських мереж. Кумулятивне розширення змісту стійкості узагальнено на рис. 2.1.

Дослідження еволюції засвідчує перехід від фінансової рівноваги та операційної безперервності до стратегічної адаптивності, організаційної життєздатності, відповідальності й цифрової резильєнтності. Кожний наступний етап розширює склад керованих параметрів і переводить стійкість із характеристики результату у здатність до керованої зміни. Методологічні відмінності основних підходів та межі їх застосування до будівельних підприємств систематизовано в табл. 2.1. Аналіз довів, що фінансовий, операційний, стратегічний, організаційний і цифрово-екосистемний підходи пояснюють різні сторони життєздатності. Методологічно обґрунтоване оцінювання потребує їх інтеграції, оскільки фінансова стабільність не компенсує інформаційну фрагментованість, а цифрові інструменти не усувають дефіциту ресурсів, компетентностей або довіри між учасниками. Проєктний характер діяльності посилює несталість управлінських структур. Кожен будівельний проєкт має власну конфігурацію учасників, ризиків, контрактів, технологічних рішень і територіальних обмежень. Внаслідок цього управлінські процедури не можуть повністю спиратися на повторюваність. Стійкість формується через здатність підприємства швидко створювати працездатну проєктну архітектуру, закріплювати відповідальність, забезпечувати якість даних і підтримувати керованість виконання робіт.

	1. Фінансова стабільність	2. Операційна безперервність	3. Стратегічна адаптивність	4. Організаційна життєздатність	5. Сталість та відповідальність	6. Цифрова резильентність
	1950-ті – 1980-ті	1990-ті – 2000-ті	2000-ті – 2010-ті	2010-ті – 2015	2015 – 2020	2020-ті – дотепер
Ключова ідея етапу	Забезпечення фінансової рівноваги та платоспроможності підприємства	Забезпечення безперервного виконання операцій та проєктів	Здатність до адаптації та розвитку в умовах змін середовища	Стійкість через людей, культуру, лідерство та внутрішню взаємодію	Інтеграція принципів сталості та відповідального врядування	Стійкість на основі даних, цифрових технологій та екосистемної взаємодії
Фокус управління	Фінансові ресурси, ліквідність, прибутковість	Процеси, якість, строки, ресурси	Стратегія, інновації, ринок, конкурентні переваги	Персонал, культура, лідерство, компетентності, комунікації	Екологічні, соціальні та управлінські аспекти (ESG)	Дані, цифрові технології, платформи, екосистеми
Ключові критерії менеджменту	- Платоспроможність - Ліквідність - Рентабельність - Фінансова стійкість	- Безперервність процесів - Якість виконання - Дотримання строків - Ефективність ресурсів	- Стратегічна гнучкість - Інноваційність - Конкурентоспроможність - Створення цінності	- Культура та цінності - Лідерство - Компетентності персоналу - Взаємодія та довіра	- Екологічна відповідальність - Соціальний вплив - Якість врядування - Етичність та прозорість	- Цифрова зрілість - Якість даних - Кібербезпека - Гнучкість та масштабованість
Джерела стійкості	Фінансовий капітал, структура капіталу, грошові потоки	Операційні ресурси, технології, процеси, постачання	Стратегічні ресурси, знання, технології, ринкові можливості	Людський капітал, організаційна культура, соціальні зв'язки	Природний капітал, соціальний капітал, репутація, довіра	Інформаційний капітал, цифрові платформи, мережі та партнерства
Домінуючі ризики та збурення	Дефіцит ліквідності, фінансова нестабільність, платіжні кризи	Збої в постачанні, операційні порушення, затримки проєктів	Зміни попиту, конкуренція, технологічні зрушення, регуляторні зміни	Втрата персоналу, конфлікти, низька мотивація, організаційна інертність	Екологічні ризики, соціальні конфлікти, репутаційні втрати, ризики невідповідності	Кіберризики, порушення даних, технологічні збої, ризики екосистемної залежності
Управлінська модель	Фінансово-стабілізаційна	Операційно-процесна	Стратегічно-адаптивна	Організаційно-поведінкова	ESG-орієнтована	Цифрово-екосистемна
Інструменти управління	Фінансовий аналіз, бюджетування, контроль витрат, управління оборотним капіталом	Процесний менеджмент, планування виробництва, управління запасами, контроль якості	Стратегічне планування, аналіз середовища, управління портфелем, інноваційний менеджмент	Управління персоналом, розвиток компетентностей, внутрішні комунікації, зміни та навчання	ESG-менеджмент, нефінансова звітність, оцінка впливів, стейкхолдер-менеджмент	Цифрова аналітика, AI/ML, IoT, BIM, цифрові платформи, кібербезпека, управління даними
Результат для підприємства	Збереження фінансової рівноваги та уникнення банкрутства	Стабільність операційної діяльності та виконання зобов'язань	Здатність до розвитку та формування довгострокових конкурентних переваг	Підвищення залученості персоналу та організаційної життєздатності	Стійкий розвиток та підвищення довіри стейкхолдерів і суспільства	Резильентність, адаптивність і мережеві переваги на основі даних та інновацій

Рис. 2.1. Еволюція концепції стійкості підприємств

Джерело: розроблено автором на основі [72–75, 270].

**Наукові підходи до трактування стійкості підприємства та їх
методологічне значення для будівництва**

Підхід	Зміст трактування	Інструментарій	Обмеження для будівельних підприємств
Фінансовий	Стійкість як здатність підтримувати платоспроможність, ліквідність і достатність власного капіталу	Фінансові коефіцієнти, моделі прогнозування, антикризове управління	Не враховує якість даних, партнерську взаємодію, цифрові ризики та регуляторні зміни
Операційний	Стійкість як безперервність виконання процесів і зобов'язань	Управління проектами, ощадливе будівництво, планування ресурсів, контроль строків	Може ігнорувати довгострокову адаптацію та залежність від зовнішніх учасників
Стратегічний	Стійкість як здатність зберігати конкурентоспроможність у змінному середовищі	Динамічні здатності, сценарне планування, інноваційні стратегії	Потребує операційної деталізації та вимірюваних показників
Організаційний	Стійкість як життєздатність управлінської системи, культури та людського потенціалу	Лідерство, навчання, управління знаннями, організаційна культура	Складно формалізується через переважання якісних характеристик
Цифрово-екосистемний	Стійкість як здатність підприємства діяти на основі даних, платформної взаємодії та мережевої координації	Інформаційне моделювання будівель, цифрові двійники, аналітика, цифрові платформи, інформаційна безпека	Вимагає стандартизації даних, цифрової зрілості та узгоджених правил взаємодії між учасниками
Підхід	Зміст трактування	Інструментарій	Обмеження для будівельних підприємств
Фінансовий	Стійкість як здатність підтримувати платоспроможність, ліквідність і достатність власного капіталу	Фінансові коефіцієнти, моделі прогнозування, антикризове управління	Не враховує якість даних, партнерську взаємодію, цифрові ризики та регуляторні зміни

Джерело: узагальнено автором на основі [31; 72–75; 80–90].

Тривалі інвестиційні цикли і висока капіталомісткість створюють додаткову вразливість. Будівельний проєкт часто проходить через періоди зміни цін на матеріали, валютних коливань, перегляду нормативних вимог, кадрового дефіциту, зміни умов фінансування і суспільних очікувань [279]. Аналітичні звіти McKinsey, Deloitte та KPMG наголошують, що галузь залишається схильною до перевищення бюджетів, затримок, ризиків постачання та дефіциту продуктивності [78–80]. Отже, фінансова стійкість будівельного підприємства нерозривно пов'язана з якістю проєктного управління і здатністю прогнозувати збурення на ранніх етапах.

Тривалі інвестиційні цикли й висока капіталомісткість посилюють чутливість до зміни цін на матеріали, вартості капіталу, логістичних обмежень, кадрового дефіциту та перегляду нормативних вимог [272]. Аналітичні матеріали McKinsey, Deloitte і KPMG фіксують поєднання низької продуктивності, перевищення бюджетів, ризиків постачання та нерівномірної цифрової зрілості будівельних компаній [29; 77; 78].

Екологічний вимір розширює поняття стійкості за межі поточної операційної результативності. Висока енерго- й матеріаломісткість галузі, вуглецевий слід і значні обсяги відходів зумовлюють потребу враховувати життєвий цикл матеріалів, енергоефективність, циркулярність і довгострокові зобов'язання перед користувачами та територіальними громадами [14; 26; 35; 60].

Український контекст поєднує воєнні руйнування, необхідність масштабного відновлення, дефіцит ресурсів і потребу гармонізації з європейськими правилами [263]. Дослідження цифрової трансформації будівельних підприємств виявляють бар'єри вартості, компетентностей, стандартизації, сумісності програмних середовищ, організаційної культури та контрактного закріплення інформаційних зобов'язань [18–21; 91]. Галузеві детермінанти та відповідні управлінські вимоги узагальнено в табл. 2.2.

Наведена систематизація доводить, що ризики є постійною властивістю будівельної діяльності, а не винятковим відхиленням. Тому резильєнтна

модель має забезпечувати стандартизацію повторюваних процедур, сценарне планування, резервування критичних ресурсів, цифрову простежуваність, договірну координацію та адаптивний перерозподіл відповідальності.

Таблиця 2.2

Галузеві детермінанти стійкості підприємств-стейкхолдерів будівельних проєктів

Детермінанта	Прояв у будівельній діяльності	Управлінська вимога
Проєктність діяльності	Унікальність об'єктів, тимчасовість управлінських структур, велика залежність від координації учасників	Стандартизація процедур, матриця відповідальності, цифровий реєстр рішень
Тривалі інвестиційні цикли	Підвищена чутливість до зміни цін, вартості капіталу, регуляторних умов і попиту	Сценарне планування, резервування ресурсів, контроль життєвого циклу
Фрагментованість ланцюгів створення вартості	Залежність від підрядників, постачальників і проєктних партнерів	Партнерські угоди, спільне середовище даних, управління договірними ризиками
Матеріаломісткість та екологічний вплив	Висока частка матеріальних витрат, відходів, енергоспоживання і викидів	Оцінювання життєвого циклу, вибір матеріалів за критеріями сталості, екологічний контроль
Цифрова нерівномірність	Відмінності у рівні цифрової зрілості учасників одного проєкту	Єдині правила даних, навчання персоналу, цифрова інтеграція процесів
Регуляторна залежність	Значна роль дозволів, будівельних норм, екологічних вимог і процедур контролю	Правовий моніторинг, внутрішні регламенти, доказова звітність

Джерело: узагальнено автором на основі [14; 18–21; 26; 29; 31; 77; 78; 91].

Для аналітичного розмежування короткострокової реакції та довгострокової спроможності використано два взаємодоповнювальні виміри. Перший відображає річну зміну фізичного обсягу будівельної продукції та характеризує інтенсивність поточної адаптації. Другий відображає накопичену траєкторію відносно базового року й характеризує здатність галузі компенсувати попередні втрати. Поєднання цих вимірів запобігає підміні резильєнтності окремим позитивним приростом.

Річний індекс будівельної продукції характеризує зміну фізичного обсягу виробленої продукції порівняно з попереднім роком. Кумулятивний індекс розраховано за формулою:

$$C_t = C_{t-1} \times I_t / 100, \quad (2.1)$$

де C_t – кумулятивний індекс фізичного обсягу в році t ;

I_t – індекс будівельної продукції до попереднього року;

$C_{2010} = 100$.

Отриманий ряд використано як індикатор відновленої виробничої бази, а не як оцінку вартості робіт. Вартісні показники аналізуються окремо, оскільки вони формуються під впливом цін на матеріали, оплату праці, логістику, енергоресурси та зміни структури замовлень.

Структурний аналіз здійснено у двох площинах. Перша відображає розподіл будівельної продукції між житловими, нежитловими будівлями та інженерними спорудами. Друга характеризує роботи за характером будівництва. Для 2013–2019 років показник нового будівництва включав реконструкцію і технічне переоснащення, тоді як з 2020 року ці роботи виділено окремо. Отже, розрив між 2019 і 2020 роками містить методологічну складову. У тексті він інтерпретується як зміна статистичного представлення, а економічний висновок формулюється переважно за внутрішньо зіставними періодами 2013–2019 та 2020–2024 років.

Капітальні інвестиції, чисельність найманих працівників і фінансові результати розглядаються як ресурсні та адаптаційні передумови. Їх одночасний аналіз дозволяє встановити, чи супроводжується зростання виробничої активності відновленням довгострокового капіталу, трудового потенціалу та фінансового резерву. Саме узгодженість цих компонентів, а не позитивне значення одного показника, свідчить про зміцнення резильєнтності.

Річна динаміка індексу будівельної продукції у 2011–2024 роках свідчить про послідовне проходження декількох якісно відмінних фаз. Після зростання 2011 року галузь увійшла у смугу скорочення 2012–2015 років, причому найбільше падіння в межах цього циклу зафіксовано у 2014 році – до

79,6 % рівня попереднього року. Відновлення 2016–2019 років було інтенсивним: річні індекси перевищували 100 %, а у 2017 і 2019 роках становили відповідно 126,4 та 123,6 %. У 2020–2021 роках позитивна динаміка зберігалася, але її амплітуда зменшилася, що характеризує перехід від прискореного розширення до помірного зростання.

Повномасштабне вторгнення спричинило розрив попередньої траєкторії: у 2022 році індекс становив 35,2 %, тобто фізичний обсяг скоротився на 64,8 % порівняно з 2021 роком. Зростання у 2023 році на 25,0 % та у 2024 році на 18,6 % засвідчує відновлення операційної активності, проте не компенсує базове падіння. Саме цей результат є принциповим для методології оцінювання: позитивні темпи після шоку характеризують швидкість реакції, але не підтверджують повернення до попередньої виробничої спроможності.

Динаміку поточної адаптації будівельної галузі відображено на рис. 2.2.

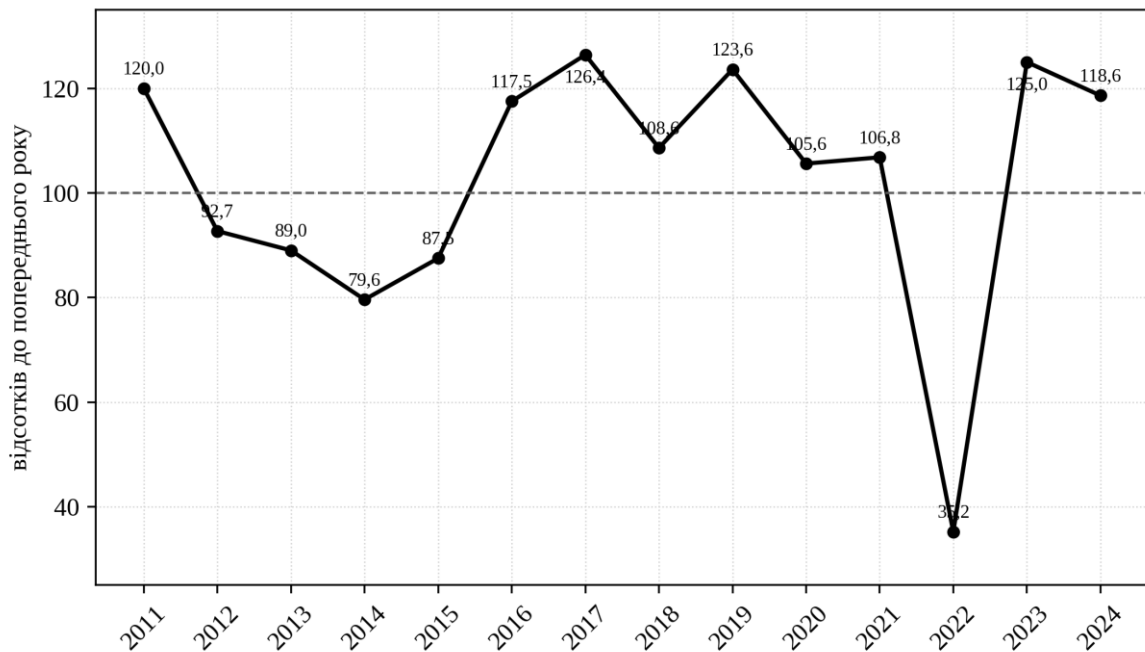


Рис. 2.2. Динаміка індексу будівельної продукції в Україні у 2011–2024 роках

Джерело: побудовано автором за даними Державної служби статистики України [94].

Фазова інтерпретація показує, що будівельна галузь України до 2022 року вже мала досвід адаптації до циклічних спадів, однак масштаб воєнного

шоку якісно відрізняється від попередніх коливань. Падіння 2012–2015 років було розтягнутим у часі та частково компенсувалося наступним чотирирічним зростанням. Шок 2022 року був одномоментним, поєднав фізичне руйнування активів, розрив ланцюгів постачання, міграцію працівників, обмеження доступу до територій і зміну структури замовлень. Тому перенесення закономірностей попередніх циклів на воєнний період без коригування є методологічно некоректним.

Кумулятивна траєкторія уточнює масштаб незавершеного відновлення. За бази 2010 року, прийнятої за 100, фізичний обсяг будівельної продукції досяг приблизно 155,0 у 2021 році. Після падіння 2022 року він знизився до 54,6, а в 2024 році відновився лише до 80,9. Отже, реальний обсяг 2024 року становив близько 52,2 % рівня 2021 року і залишався нижчим за базовий рівень 2010 року. Позитивна динаміка двох останніх років відображає часткове відновлення, але не повернення до довоєнного масштабу діяльності.

Кумулятивну траєкторію фізичного обсягу подано на рис. 2.3.

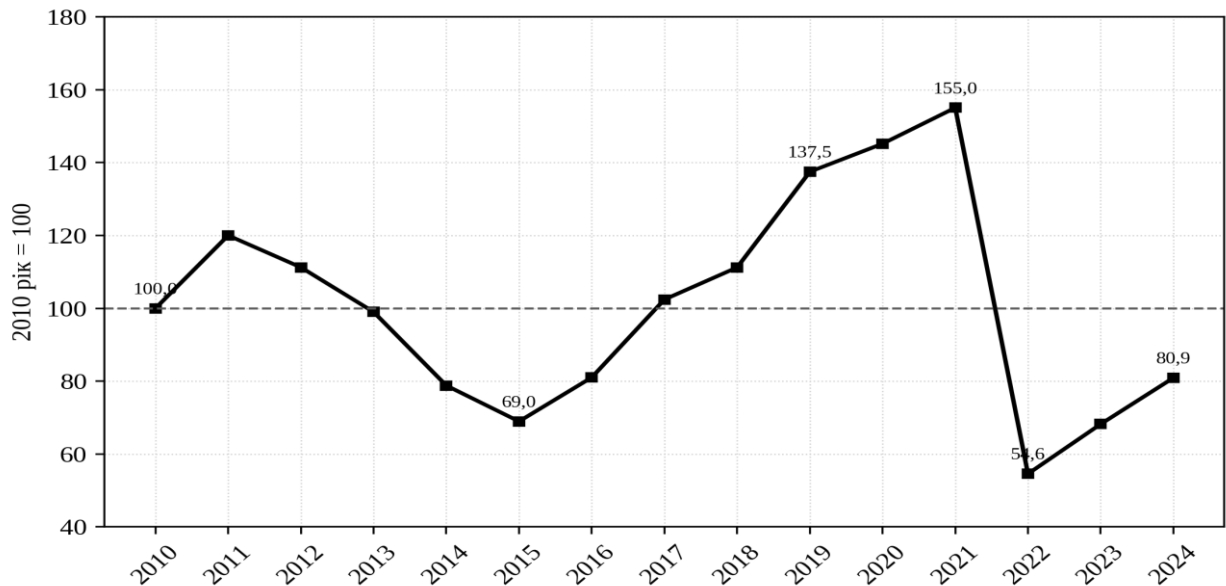


Рис. 2.3. Кумулятивна траєкторія фізичного обсягу будівельної продукції України у 2010–2024 роках

Джерело: розраховано автором методом ланцюгового індексування за даними Державної служби статистики України [94].

Порівняння кумулятивного фізичного індексу з номінальним обсягом виявляє асиметрію відновлення. У фактичних цінах обсяг будівельної

продукції 2024 року дорівнював 81,4 % рівня 2021 року, тоді як фізичний обсяг – лише 52,2 %. Різниця між цими оцінками відображає ціновий чинник, зміну структури робіт і особливості статистичного охоплення. Виявлена залежність означає, що зростання грошових потоків не може автоматично трактуватися як відновлення виробничої потужності, а фінансові показники підприємств мають нормуватися з урахуванням галузевого цінового та структурного контексту.

Взаємне прочитання річного та кумулятивного індексів дозволяє розмежувати швидкість реакції й повноту відновлення. Позитивний приріст після глибокого падіння свідчить про відновлення операційної активності, але не підтверджує повернення до попередньої виробничої спроможності; тому порогові значення показників підприємства мають інтерпретуватися з урахуванням базового ефекту.

Фази зміни галузевого середовища та відповідні режими управління наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Фази розвитку будівельної галузі та їх управлінське значення для підприємств-стейкхолдерів

Період	Динамічна характеристика	Домінантні галузеві умови	Управлінський імператив
2011–2015	Нестійке скорочення після короткого зростання	Накопичення втрат, зниження попиту, звуження інвестиційної бази	Потреба у скороченні постійних витрат і збереженні критичних компетентностей
2016–2019	Прискорене відновлення та розширення	Відновлення інвестиційного попиту, зростання інженерного будівництва	Масштабування ресурсів і міжорганізаційних зв'язків
2020–2021	Помірне зростання за нових обмежень	Адаптація до пандемічних і логістичних порушень	Цифровізація координації та підвищення гнучкості процесів
2022	Системний воєнний шок	Руйнування активів, територіальні обмеження, розрив постачання, кадрові втрати	Збереження критичних функцій, безпеки та ліквідності
2023–2024	Часткове відновлення з низької бази	Інфраструктурні та відновлювальні замовлення за неповного ресурсу	Перебудова портфеля, партнерств і процедур контролю даних

Джерело: сформовано автором за результатами аналізу індексів будівельної продукції [94].

Виділені фази утворюють не лише ретроспективну періодизацію. Вони задають різні режими управління підприємствами-стейкхолдерами. У фазі розширення домінує завдання масштабування потужностей; у фазі поступового скорочення – оптимізація структури витрат; у фазі системного шоку – збереження критичних функцій; у фазі часткового відновлення – вибіркова реконфігурація портфеля та партнерської мережі. Отже, резильєнтність має оцінюватися відносно режиму середовища, а однакове значення внутрішнього показника може мати різний управлінський зміст у різних фазах.

З метою виявлення змін у джерелах попиту, масштабах, сегментній структурі та якісних параметрах під впливом руйнування інфраструктури, потреб повоєнного відновлення, євроінтеграційних вимог, декарбонізації й цифровізації галузі, а також визначення того, як ці зміни трансформують умови діяльності підприємств-стейкхолдерів, вимоги до їхніх ресурсів, компетентностей і моделей взаємодії здійснено аналіз структурної реконфігурації будівельного попиту [163]. Результати аналізу формують аналітичне підґрунтя для оцінювання здатності підприємств адаптуватися до зміни структури замовлень, перерозподілу інвестиційних потоків і посилення вимог до біосферосумісності, а отже – для обґрунтування параметрів їхньої стійкості та резильєнтності в проєктній екосистемі будівництва.

Вартісний ряд 2010–2024 років демонструє довгострокове номінальне збільшення обсягу будівельної продукції з 42,9 млрд грн до 210,2 млрд грн. Проте траєкторія не є монотонною: спад 2013–2014 років змінився прискореним зростанням 2016–2021 років, після чого обсяг у 2022 році скоротився до 114,9 млрд грн. У 2023–2024 роках номінальне відновлення становило відповідно 165,8 і 210,2 млрд грн, але рівень 2021 року – 258,1 млрд грн – не був досягнутий.

Найбільшу частину вартісного обсягу протягом більшості років формували інженерні споруди. У 2024 році на них припадало 122,6 млрд грн, або 58,3 % загального обсягу. Нежитлові будівлі формували 60,2 млрд грн, або

28,6 %, а житлові – 27,4 млрд грн, або 13,1 %. Така структура відображає переважання інфраструктурного і виробничо-сервісного попиту над житловим сегментом та створює іншу конфігурацію вимог до підприємств: більшу капіталомісткість, складнішу контрактну координацію, підвищену залежність від публічного фінансування і жорсткіші вимоги до простежуваності виконання.

Динаміку вартісного обсягу за основними видами будівельної продукції відображено на рис. 2.4.

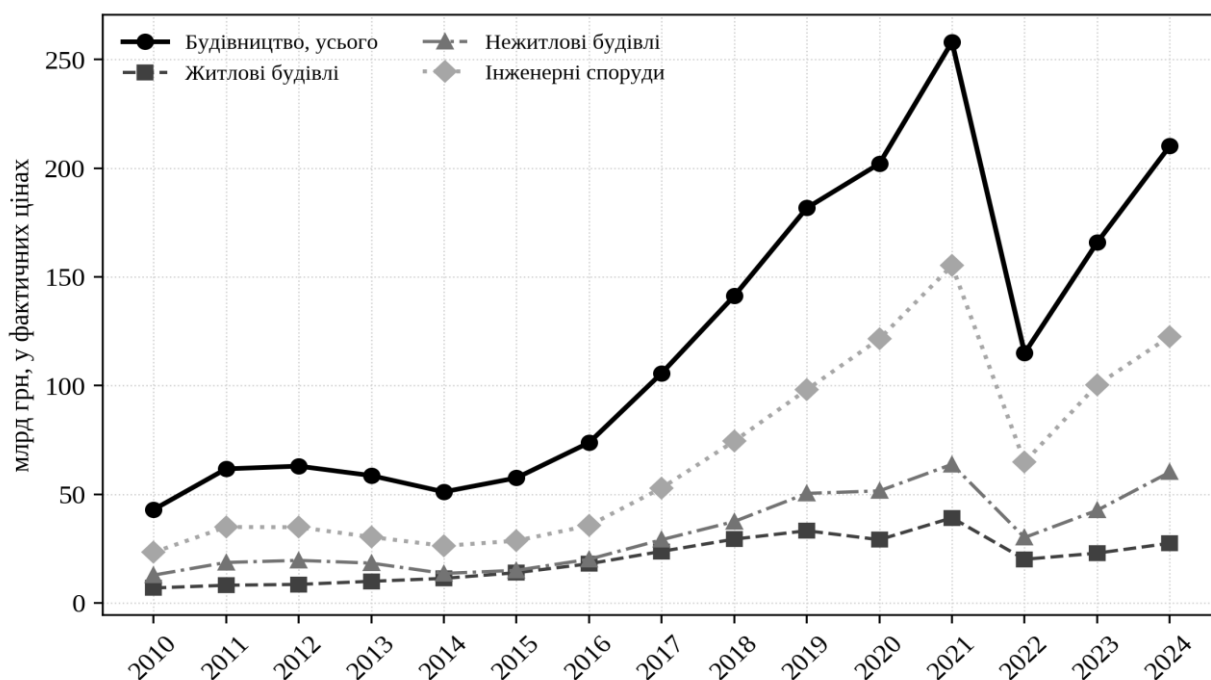


Рис. 2.4. Обсяг виробленої будівельної продукції в Україні за видами у 2010–2024 роках

Джерело: побудовано автором за даними Державної служби статистики України [95].

У структурному вимірі частка інженерних споруд зростає з 54,2 % у 2010 році до 60,1 % у 2020–2021 роках, після тимчасового зниження у 2022 році до 56,4 % знову перевищила 60 % у 2023 році та становила 58,3 % у 2024 році. Частка житлових будівель, навпаки, зменшилася з локального максимуму 24,4 % у 2016 році до 13,1 % у 2024 році. Нежитловий сегмент у 2024 році досяг 28,6 %, що є найвищим значенням після 2013 року. Виявлена конфігурація дає підстави говорити про інфраструктуризацію поточного попиту –

переорієнтацію галузевого портфеля на інженерні та нежитлові об'єкти за відносного звуження житлової компоненти. Рис. 2.4 фіксує випереджальне зростання інженерного сегмента та високу волатильність загального обсягу. Для підприємств-стейкхолдерів така конфігурація означає посилення капіталомісткості, контрактної складності й вимог до координації спеціалізованих виконавців.

Структурні частки житлових, нежитлових будівель та інженерних споруд наведено на рис. 2.5.

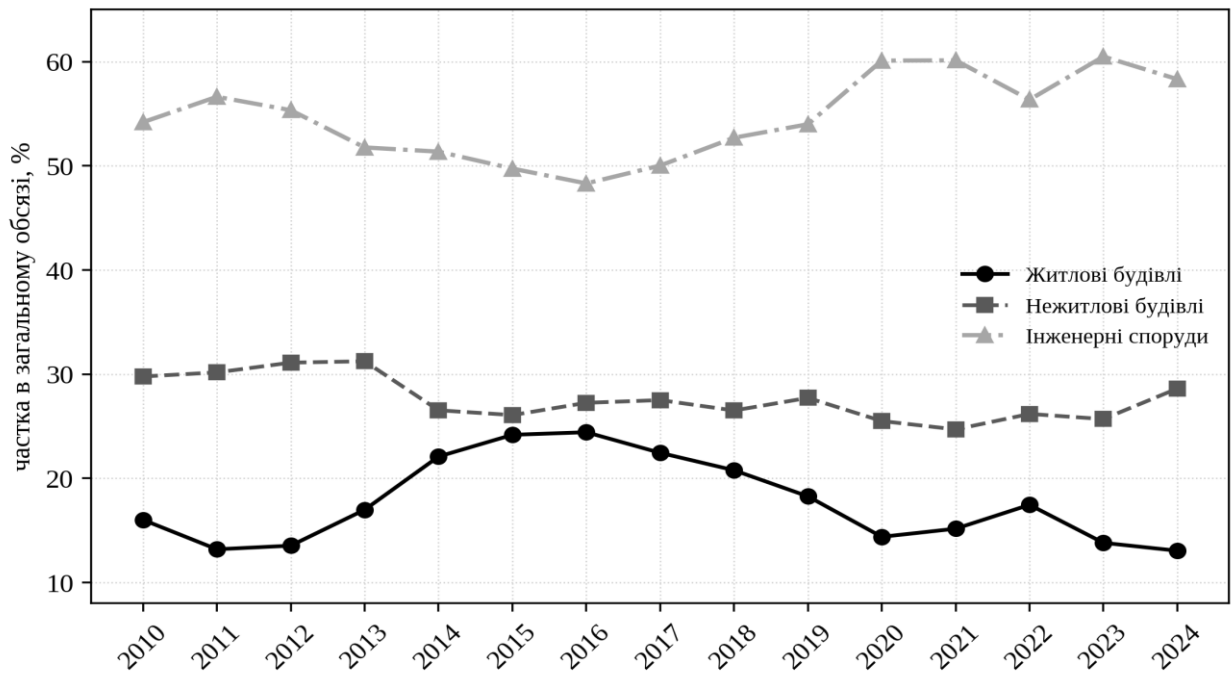


Рис. 2.5. Структурні частки основних видів будівельної продукції в Україні у 2010–2024 роках

Джерело: розраховано автором за даними Державної служби статистики України [95].

Інфраструктуризація попиту не тотожна біосферосумісній трансформації. Зростання частки інженерних споруд може бути пов'язане як із відновленням критичної інфраструктури та енергетичних систем, так і з матеріало- та вуглецемісткими проєктами, що не містять життєвоциклових екологічних критеріїв. Тому видова структура виконує функцію контекстного індикатора: вона показує, у яких сегментах концентруються ресурси, але не вимірює якість екологічних рішень.

Для підприємств-стейкхолдерів структурний зсув означає зміну профілю необхідних компетентностей. Інженерні та нежитлові проекти потребують розвиненого управління контрактами, цифрового узгодження проєктної документації, координації великої кількості спеціалізованих виконавців, контролю постачання і відповідності технічним вимогам. Відтак здатність підприємства діяти у такому сегменті визначається не лише його фінансовим масштабом, а й якістю даних, інтеграційною спроможністю та здатністю підтримувати простежуваність рішень упродовж життєвого циклу об'єкта.

Структурний зсув до інженерних і нежитлових об'єктів не є автоматичним підтвердженням біосферосумісної трансформації. Він визначає концентрацію ресурсів і компетентностей, тоді як якість екологічних рішень потребує окремих показників енергоефективності, вуглецевої інтенсивності, циркулярності матеріалів і управління відходами.

Структура будівельної продукції за характером робіт уточнює напрям трансформації галузі. У 2013–2019 роках частка нового будівництва, яка відповідно до тодішньої методики включала реконструкцію та технічне переоснащення, коливалася від 72,8 до 82,4 %. Частка ремонту зросла з 18,8 % у 2013 році до 27,2 % у 2018 році, після чого становила 25,8 % у 2019 році. Починаючи з 2020 року реконструкція і технічне переоснащення обліковуються окремо, що дає змогу точніше оцінити характер робіт.

У 2020–2024 роках нове будівництво формувало 29,6–41,1 % загального обсягу, ремонт – 32,6–45,1 %, реконструкція і технічне переоснащення – 21,3–27,1 %. У 2024 році частка нового будівництва підвищилася до 41,1 %, частка ремонту зменшилася до 32,6 %, а реконструкції та технічного переоснащення зросла до 26,3 %. Порівняно з 2023 роком це означає посилення двох напрямів – створення нових об'єктів і глибокого оновлення існуючих – за зменшення питомої ваги ремонтних робіт.

Зміни структури робіт за характером будівництва відображено на рис. 2.6.

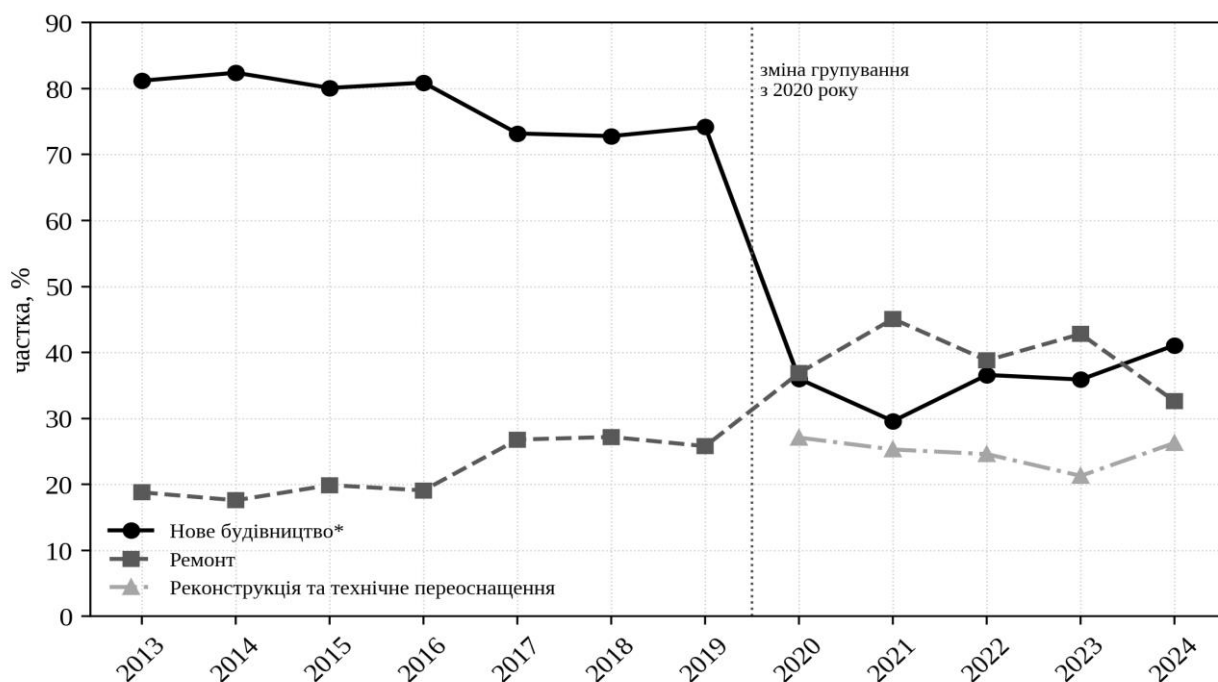


Рис. 2.6. Структура будівельної продукції за характером будівництва у 2013–2024 роках

Примітка. До 2019 року включно показник нового будівництва охоплював реконструкцію та технічне переоснащення; з 2020 року ці роботи виділено окремо, тому розрив між 2019 і 2020 роками не слід трактувати як суто економічну зміну.

Джерело: побудовано автором за даними Державної служби статистики України [95].

Підвищена частка ремонту та реконструкції створює передумови для переходу від управління окремим будівельним продуктом до управління життєвим циклом активу. Водночас сам факт реконструкції не гарантує біосферосумісності. Вона набуває такого змісту лише за умови, що рішення ґрунтуються на оцінюванні життєвого циклу, зниженні операційного енергоспоживання, повторному використанні матеріалів, управлінні відходами, мінімізації вуглецевого сліду та цифровій фіксації технічних і екологічних характеристик.

Для управління підприємствами-стейкхолдерами ця тенденція змінює структуру ризиків. У новому будівництві основними є ризики проєктування, дозволів, фінансування та введення в експлуатацію. У реконструкції до них додаються ризики неповноти інформації про існуючий об'єкт, прихованих дефектів, сумісності нових і наявних систем, поводження з демонтованими матеріалами та безперервності функціонування об'єкта. Отже, зростання

частки реконструкції підвищує цінність цифрових моделей активу, обстежень, реєстрів матеріалів і процедур верифікації вихідних даних.

Виявлена структурна конфігурація обґрунтовує включення до методологічної архітектури резильєнтності життєвоциклового контуру. Його зміст полягає у здатності підприємства зберігати та оновлювати інформацію про об'єкт, адаптувати технологічні рішення до його фактичного стану, оцінювати довгострокові витрати і екологічні наслідки, а також передавати верифіковані дані між фазами проєктування, будівництва, експлуатації та модернізації.

Зростання частки реконструкції підвищує цінність цифрових моделей наявного активу, технічних обстежень, паспортів матеріалів і верифікації вихідних даних. Життєвоцикловий контур резильєнтності має забезпечувати передавання достовірної інформації між проєктуванням, виконанням, експлуатацією та модернізацією.

Капітальні інвестиції визначають здатність підприємств оновлювати технічну базу, впроваджувати цифрові технології, підвищувати енергоефективність та формувати резерви для участі у складних проєктах [250]. У 2020 році їх обсяг у будівництві становив 39,6 млрд грн, у 2021 році збільшився до 55,7 млрд грн, у 2022 році скоротився до 32,6 млрд грн, а в 2023–2024 роках відновився до 42,2 і 49,8 млрд грн відповідно. Номінальний обсяг 2024 року дорівнював 89,4 % рівня 2021 року.

Водночас частка будівництва у загальному обсязі капітальних інвестицій зменшилася з 8,27 % у 2021 році до 6,70 % у 2024 році. Отже, номінальне відновлення вкладень відбувалося повільніше, ніж загальне відновлення інвестиційної активності в економіці. Виявлена динаміка свідчить про відносне послаблення інвестиційної позиції виду економічної діяльності та обмежує можливості одночасно фінансувати операційне відновлення, технологічне переоснащення й екологічну модернізацію.

Співвідношення обсягу капітальних інвестицій у будівництво та їх частки в економіці наведено на рис. 2.7.

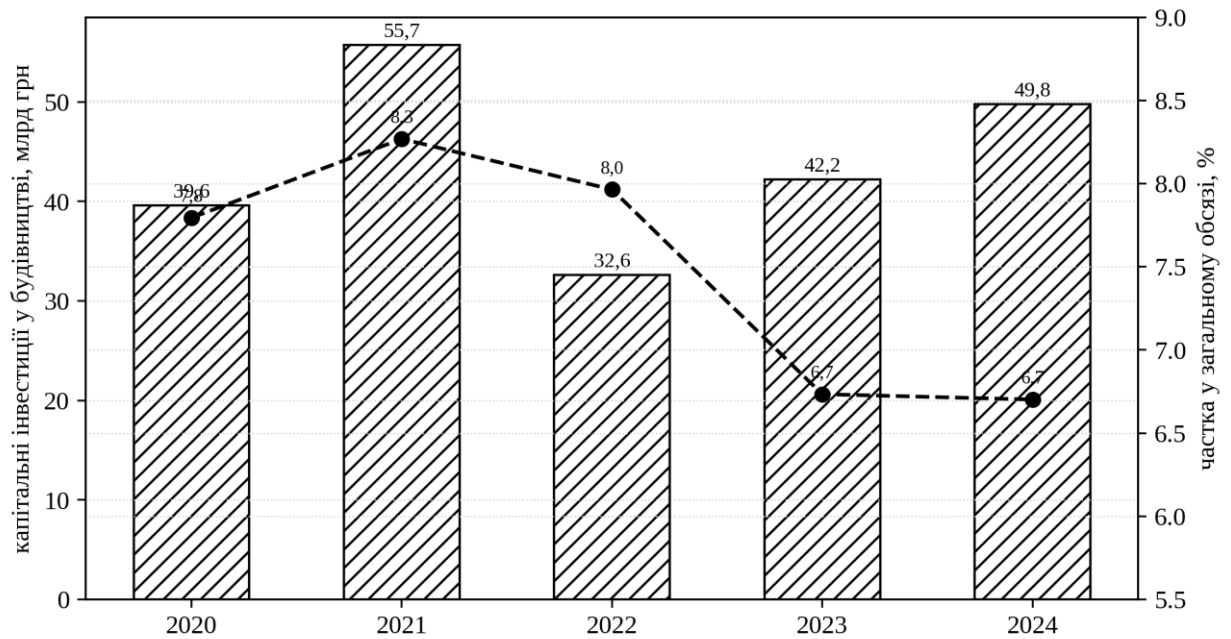


Рис. 2.7. Капітальні інвестиції у будівництво та їх частка у загальному обсязі капітальних інвестицій України у 2020–2024 роках

Джерело: побудовано та розраховано автором за даними Державної служби статистики України [96].

Зниження частки капітальних інвестицій має двоїстий вплив на резильєнтність. У короткостроковому періоді підприємства можуть підтримувати виконання робіт за рахунок наявних активів, оренди техніки, субпідряду та перенесення інвестицій. У середньостроковому періоді така стратегія посилює технологічну залежність, підвищує витрати експлуатації, обмежує цифрову інтеграцію і знижує здатність відповідати новим вимогам до екологічної результативності. Тому інвестиційна стриманість може бути адаптивною реакцією лише протягом обмеженого часу; її тривале збереження трансформується у структурну вразливість.

Другою ресурсною передумовою є трудовий потенціал. Кількість найманих працівників у будівництві зменшилася з 462,8 тис. осіб у 2010 році до 197,0 тис. осіб у 2024 році, тобто на 57,4 %. Після часткового відновлення до 301,4 тис. осіб у 2021 році у 2022 році чисельність скоротилася до 224,9 тис. осіб, у 2023 році – до 197,7 тис. осіб, а у 2024 році залишилася майже незмінною. Порівняно з 2021 роком трудова база скоротилася на 34,6 %.

Динаміку трудової бази будівництва відображено на рис. 2.8.

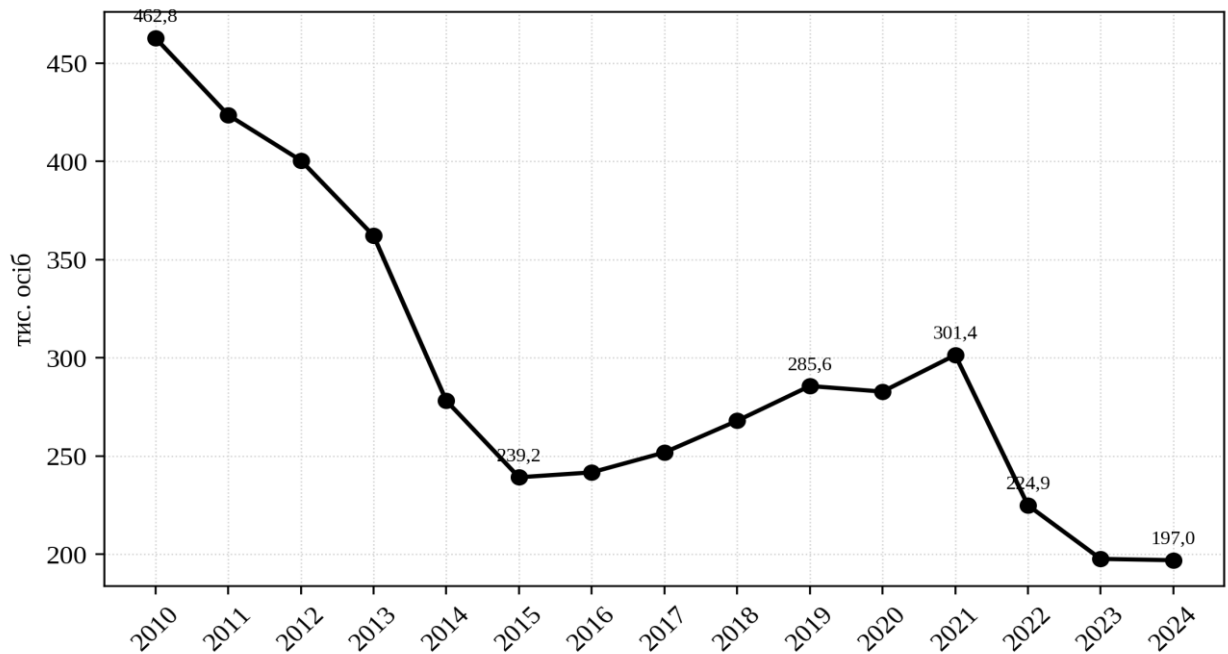


Рис. 2.8. Динаміка кількості найманих працівників у будівництві України у 2010–2024 роках

Джерело: побудовано автором за даними Державної служби статистики України [99].

Тривале скорочення зайнятості не може бути пояснене лише падінням обсягів робіт. Воно відображає сукупний вплив демографічних змін, міграції, неформальної зайнятості, технологічної перебудови, мобілізації та зміни організаційних моделей. Для проєктної екосистеми наслідком є підвищена залежність від дефіцитних компетентностей і субпідрядних мереж. Підприємство може мати достатній портфель замовлень, але не мати спроможності синхронно забезпечити проєктувальні, інженерні, цифрові, екологічні та виробничі функції.

За умов ресурсної компресії стійкість не повинна вимірюватися кількістю персоналу як такою. Визначальними стають відповідність компетентностей функції підприємства у проєкті, здатність швидко формувати команди, цифрово координувати розподілених виконавців, зберігати критичні знання та запобігати втраті технологічної пам'яті [175]. Тому трудовий показник у подальшій індикативній системі має доповнюватися оцінками компетентнісного профілю, плинності, безперервності функцій і цифрової підтримки співпраці.

Одночасне неповне відновлення капітальних інвестицій і різке звуження трудової бази утворюють ресурсний розрив. З одного боку, збільшується потреба у відновленні та модернізації об'єктів; з іншого – підприємства мають обмежений потенціал для нарощування технічних і кадрових потужностей. Цей розрив підвищує ризик перевантаження виконавців, подовження строків, зростання вартості та зниження якості. Для біосферосумісних проєктів ризик є вищим, оскільки вони потребують додаткових компетентностей з оцінювання життєвого циклу, енергомодельовання, екологічного нормування і цифрового управління даними.

Одночасне неповне відновлення інвестицій і скорочення кадрової бази формують ресурсний розрив між масштабом відновлювального попиту та спроможністю виконавців. Управлінська відповідь має зміщуватися від механічного нарощування ресурсів до пріоритизації критичних активів, формування резерву компетентностей, цифрового планування завантаження та кооперації у проєктній екосистемі.

Фінансовий результат будівельних підприємств у 2010–2024 роках характеризувався високою волатильністю. Сукупний збиток до оподаткування у 2014 році становив 27,3 млрд грн, у 2015 році – 25,1 млрд грн. У 2018–2019 роках галузь перейшла до позитивного результату – 6,4 та 16,0 млрд грн, у 2020 році знову зафіксовано від'ємне сальдо 2,0 млрд грн, а у 2021 році – прибуток 8,4 млрд грн. Воєнний шок 2022 року спричинив збиток 17,6 млрд грн. У 2023–2024 роках сальдо стало позитивним, але скоротилося з 4,0 до 1,3 млрд грн.

Позитивне сальдо 2024 року не свідчить про однорідне фінансове відновлення. Сукупний прибуток прибуткових підприємств становив 24,8 млрд грн, тоді як збиток збиткових – 23,5 млрд грн. Невелика різниця між двома значними потоками формує крихку рівновагу, чутливу до зміни вартості матеріалів, строків розрахунків, доступу до фінансування та концентрації замовлень. За такого стану середній галузевий результат приховує істотну поляризацію підприємств.

Волатильність фінансового результату до оподаткування показано на рис. 2.9.

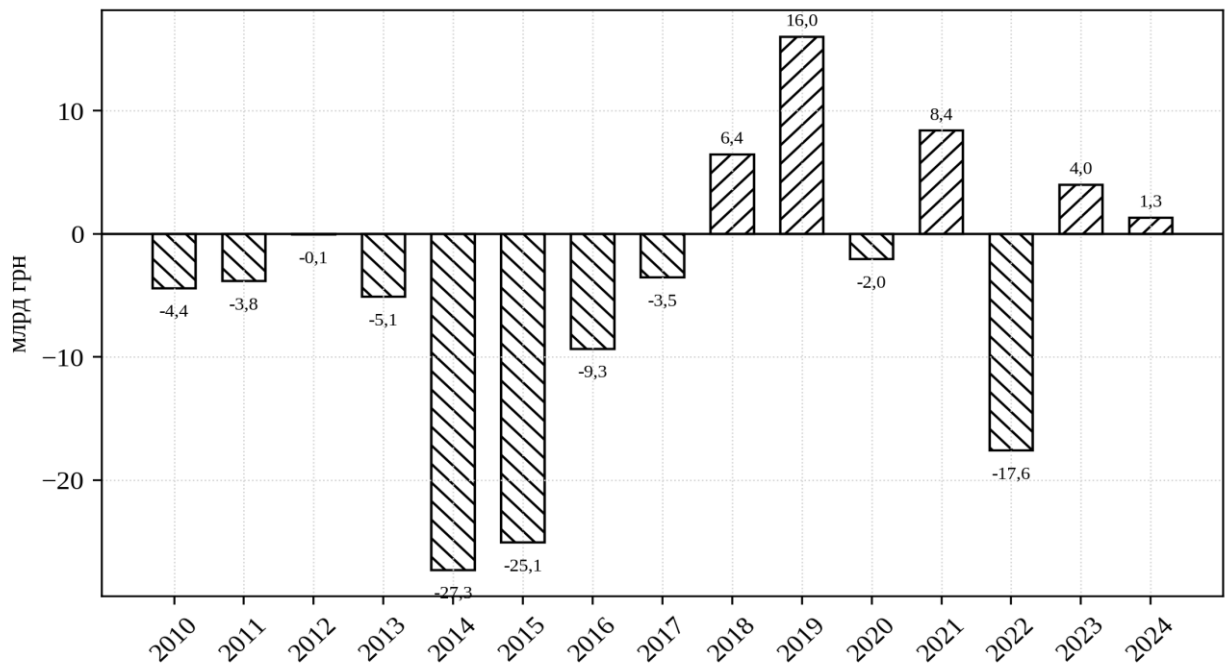


Рис. 2.9. Фінансовий результат до оподаткування підприємств будівництва у 2010–2024 роках

Джерело: побудовано автором за даними Державної служби статистики України [98].

Частка прибуткових підприємств зросла з 55,3 % у 2010 році до 73,8 % у 2019 році, зменшилася до 62,4 % у 2022 році та відновилася до 69,4 % у 2024 році. Частка збиткових підприємств відповідно становила 30,6 %. Отже, майже третина підприємств залишалася збитковою, хоча сукупний галузевий результат був позитивним. Наведене співвідношення підтверджує обмеженість середніх показників для відбору учасників проєктної екосистеми: фінансова спроможність має оцінюватися на рівні конкретного підприємства та співвідноситися з його функцією, контрактним навантаженням і ризиками проєкту.

Розподіл підприємств за прибутковістю та збитковістю наведено на рис. 2.10.

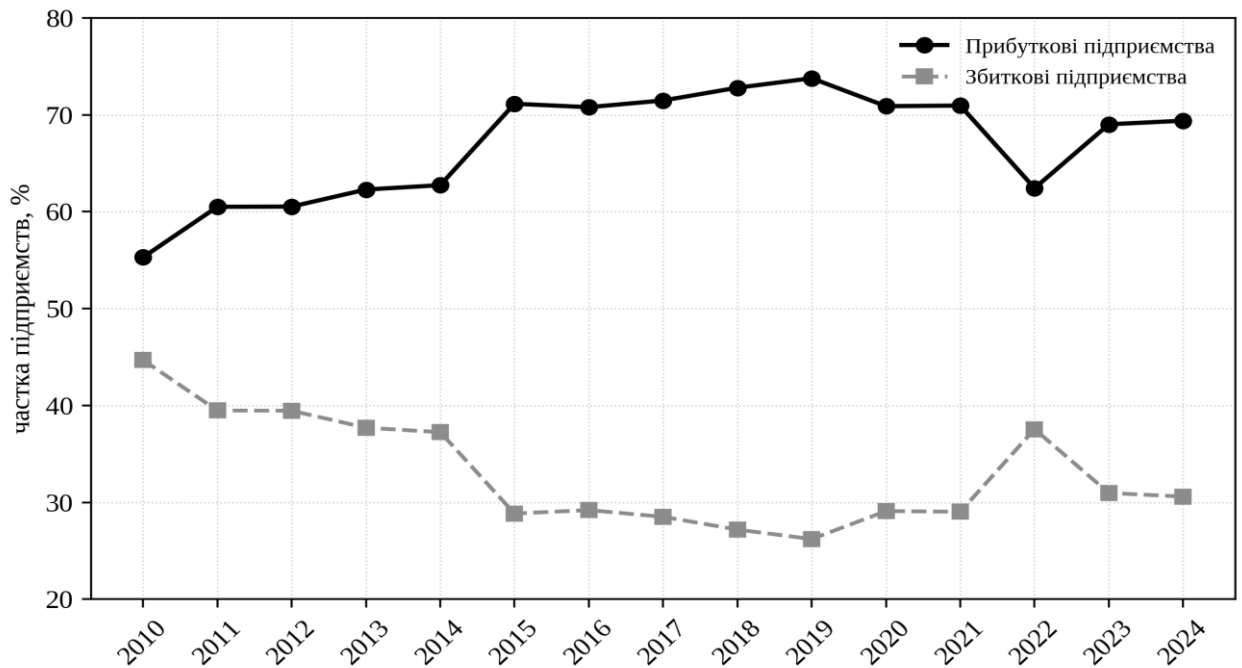


Рис. 2.10. Частка прибуткових і збиткових підприємств будівництва України у 2010–2024 роках

Джерело: побудовано автором за даними Державної служби статистики України [98].

Фінансова резильєнтність у проєктному середовищі визначається не лише прибутковістю звітного року. Вона включає ліквідність, якість грошового потоку, здатність фінансувати розрив між виконанням і оплатою робіт, наявність резервів, диверсифікацію замовників, боргове навантаження та стійкість до зміни вартості ресурсів. Позитивний фінансовий результат за відсутності ліквідності не забезпечує безперервності виконання контракту, так само як тимчасовий збиток не обов'язково означає втрату спроможності, якщо підприємство має резерви й обґрунтовану інвестиційну програму.

Для біосферосумісного будівництва фінансова адаптивність має додатковий вимір. Екологічні та цифрові рішення часто потребують початкових інвестицій, тоді як економічний ефект реалізується протягом життєвого циклу об'єкта. Підприємство з нестабільним грошовим потоком схильне скорочувати витрати, ефект яких відкладений у часі, зокрема на енергомодельовання, екологічне оцінювання, сертифікацію, цифрові паспорти матеріалів і моніторинг. Тому фінансова оцінка має виявляти не тільки

здатність завершити поточний контракт, а й спроможність виконати довгострокові екологічні зобов'язання.

Поєднання позитивного галузевого сальдо зі значною часткою збиткових підприємств свідчить про фінансову поляризацію. Відбір учасників проєктної екосистеми має спиратися не на прибуток звітного року, а на ліквідність, якість грошового потоку, резерви, боргове навантаження, концентрацію замовлень і спроможність фінансувати довгострокові цифрові та екологічні зобов'язання.

Проведений аналіз дозволяє визначити сукупність галузевих детермінант, які формують зовнішній контекст економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами. Їх доцільно подавати не як один агрегований показник, а як вектор стану середовища, оскільки передчасне згортання різномірних параметрів приховує джерело вразливості. Запропоновано контекстний вектор галузевої резильєнтності:

$$R^{env}_t = \langle P_t, S_t, K_t, L_t, F_t \rangle, \quad (2.2)$$

де P_t – виробничо-циклічний контур;

S_t – структурно-попитовий контур;

K_t – інвестиційно-капітальний контур;

L_t – трудово-компетентнісний контур;

F_t – фінансово-адаптивний контур.

Вектор не підмінює інтегральне оцінювання підприємства. Він виконує функцію зовнішнього діагностичного фону, відносно якого інтерпретуються результати підприємства та коригуються порогові значення індикаторів. Управлінський зміст контекстного вектора розкрито в табл. 2.4.

Виробничо-циклічний контур засвідчує незавершеність фізичного відновлення. Його основний методологічний наслідок полягає у необхідності розділяти швидкість відновлення і досягнутий рівень. Для підприємства це означає, що збільшення замовлень у короткому періоді може поєднуватися з високою нестабільністю середовища, а рішення про розширення постійних

потужностей мають перевірятися сценаріями повторного шоку, затримки фінансування та зміни структури портфеля.

Таблиця 2.4

Контури галузевого середовища резильєнтності підприємств-стейкхолдерів

Контур	Базові індикатори	Аналітичний зміст	Управлінський ризик
Виробничо-циклічний Р	Річний і кумулятивний індекси фізичного обсягу	Глибина шоку, швидкість і повнота відновлення	Ризик помилкового масштабування за позитивного темпу з низької бази
Структурно-попитовий S	Частки житлових, нежитлових будівель, інженерних споруд; характер робіт	Зміна портфеля замовлень і вимог до компетентностей	Невідповідність ресурсного профілю підприємства структурі попиту
Інвестиційно-капітальний К	Обсяг і частка капітальних інвестицій	Спроможність оновлювати техніку, цифрові та екологічні рішення	Технологічне старіння, залежність від оренди та субпідряду
Трудово-компетентнісний L	Кількість працівників, динаміка кадрової бази, критичні компетентності	Можливість формувати команди і підтримувати безперервність функцій	Перевантаження, втрата знань, дефіцит спеціалізованих виконавців
Фінансово-адаптивний F	Фінансове сальдо, частка прибуткових підприємств, ліквідність і грошові потоки	Здатність поглинати затримки, цінові шоки та фінансувати зобов'язання	Контрактні розриви, скорочення довгострокових екологічних інвестицій

Джерело: розроблено автором за результатами галузевого аналізу [94–99].

Структурно-попитовий контур характеризується інфраструктуризацією замовлень і значною часткою ремонту та реконструкції. Така конфігурація підвищує потребу у міжорганізаційній координації, технічному обстеженні, управлінні даними про наявні активи та роботі з невизначеністю. Для біосферосумісної трансформації такий контур створює можливість інтегрувати енергоефективність, циркулярність і життєвоциклове оцінювання у відновлення, але реалізація можливості залежить від інституційних вимог і спроможності підприємств.

Інвестиційно-капітальний і трудово-компетентнісний контури виявляють ресурсну компресію. Капітальні інвестиції не повернулися до рівня

2021 року, їх частка у загальному інвестиційному потоці зменшилася, а кількість найманих працівників істотно скоротилася. За таких умов підвищується значення не кількісного нарощування ресурсів, а їх адаптивної алокації: пріоритизації критичних активів, кооперації, цифрового планування завантаження і формування резерву компетентностей.

Фінансово-адаптивний контур характеризується відновленням позитивного сальдо за збереження значної частки збиткових підприємств і майже врівноважених обсягів прибутків та збитків у 2024 році. Виявлена динаміка свідчить про операційну адаптацію без достатнього запасу фінансової міцності. Тому відбір підприємств до проєктної екосистеми лише за показником прибутку є недостатнім; необхідне поєднання оцінки ліквідності, грошового потоку, боргового навантаження, контрактної концентрації та компонентного профілю підприємства [265].

Взаємодія контурів формує ефекти, які не відображаються окремими показниками. Зростання обсягів за скорочення зайнятості може означати підвищення продуктивності, але також перевантаження персоналу або розширення субпідряду. Зростання номінальної продукції за низького фізичного індексу може відображати подорожчання ресурсів, а не розширення спроможності. Збільшення частки реконструкції може створювати умови для екологічної модернізації, але без життєвоциклових критеріїв зводиться до відтворення попередніх неефективних рішень. Методологічна архітектоніка має виявляти такі неузгодженості, а не згладжувати їх агрегованою середньою.

Для проєктів біосферосумісного будівництва середовище не може бути описане лише динамікою будівельного виробництва або макроекономічними показниками, оскільки управлінські рішення одночасно залежать від масштабів воєнних руйнувань, соціального попиту на відновлення, цифрової спроможності підприємств, якості інституцій, доступності зовнішнього фінансування та регуляторно-данневих передумов [260].

Аналіз здійснюється для виявлення трансформації сукупності передумов, у межах яких формується економіко-цифрове управління

будівельними підприємствами. результативність підприємств-стейкхолдерів залежить одночасно від економічної динаміки будівництва, соціального запиту на відновлення, поширення цифрових практик, інституційної спроможності та масштабу зовнішніх викликів. Розгляд цих параметрів у взаємозв'язку дає змогу встановити, чи супроводжується відновлення виробничої активності відповідним розвитком цифрової та інституційної спроможності, а також виявити дисбаланси, які можуть обмежувати реалізацію проєктів біосферосумісного будівництва. У такій постановці аналіз виконує діагностичну функцію: визначає вихідну конфігурацію середовища для подальшого обґрунтування стійкості, резильєнтності та економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами [262].

Для аналізу було обрано період 2021–2025 рр., оскільки він охоплює різні стани функціонування будівельного сектору та дає можливість простежити напрям структурної трансформації його середовища. 2021 рік використано як базовий довоєнний орієнтир, що відображає стан економічних, соціальних, цифрових та інституційних параметрів до повномасштабного воєнного шоку. 2022 рік фіксує різку зміну умов господарювання, масштабне порушення виробничих і логістичних зв'язків, руйнування активів та формування нових потреб у відновленні. Період 2023–2024 рр. характеризує адаптацію підприємств, поступове відновлення будівельної активності, розширення цифрових каналів взаємодії та формування нових механізмів фінансування й інституційної координації. 2025 рік дозволяє оцінити, наскільки зміни, що виникли як реакція на кризу, набули стійкого характеру та сформували нову конфігурацію передумов економіко-цифрового управління. Таким чином, обраний п'ятирічний горизонт забезпечує порівняння станів «довоєнна база – системний шок – адаптація – часткове відновлення – формування нової управлінської конфігурації».

Метою аналізу стало формування контекстно-екосистемного контуру, який визначає умови реалізації будівельних проєктів, ризикові обмеження їх

учасників і параметри зовнішнього середовища для подальшого оцінювання економіко-цифрового управління.

Аналіз ґрунтувався на принципі функціональної достатності показників. До неї включалися лише ті індикатори, які характеризують окрему суттєву властивість середовища та можуть бути змістовно пов'язані з рішеннями підприємств-стейкхолдерів. Добір здійснювався за критеріями релевантності предмету дослідження, статистичної або інституційної надійності джерела, часової порівнюваності, інтерпретованості, чутливості до змін середовища та відсутності прямого дублювання.

Економічний вимір сформовано показниками реальної зміни ВВП, обсягу виконаних будівельних робіт, індексу будівельної продукції та індексу цін на будівельно-монтажні роботи. Їх поєднання дозволяє розмежувати загальну макроекономічну траєкторію, фактичний масштаб галузевого виробництва, зміну фізичної активності та ціновий тиск. Соціальний вимір представлено введенням житла в експлуатацію, кількістю введених квартир та індивідуальних житлових будинків і часткою житлового фонду, пошкодженого або зруйнованого внаслідок війни. Така комбінація показників дає можливість одночасно оцінити фактичну відновлювальну спроможність будівництва та масштаб незадоволеного суспільного попиту. Включення показника пошкодженого житлового фонду переводить аналіз із площини звичайної ринкової кон'юнктури у площину відновлення, де рішення щодо ресурсів, строків, технологій і фінансування визначаються не лише економічною вигідністю, а й критичністю відновлення функцій територій і громад.

Цифровий вимір сформовано так, щоб відобразити цифрову поведінку підприємств. До нього включено частку підприємств із власною інтернет-сторінкою, мобільним застосунком, використанням соціальних мереж і CRM, а також кількість підприємств, що здійснювали електронну торгівлю, обсяг електронних продажів та середній обсяг електронної торгівлі на одне підприємство [267]. Перші чотири показники характеризують цифрову

присутність, керованість взаємодії з клієнтами та спроможність підтримувати структурований інформаційний контакт; показники електронної торгівлі фіксують уже не наявність цифрового каналу, а його транзакційну реалізацію.

Інтеграційно-інституційний вимір введено для оцінювання того, наскільки зовнішня інституційна архітектура здатна підтримувати економіко-цифрову трансформацію будівництва [266]. Показники залучених грантів, пільгових кредитів і гарантій характеризують ресурсну підтримку відновлення; індекс сприйняття корупції та індекс верховенства права – якість інституційних обмежень і передбачуваність правил; складова «інституції» Глобального інноваційного індексу – загальний стан інституційного середовища інновацій [269].

Методичний інструментарій аналізу поєднав динамічний, порівняльний, індексний і структурний методи. Інформаційну основу сформовано за даними Державної служби статистики України, Національного банку України, Міністерства фінансів України, Transparency International, World Justice Project, Portulans Institute, WIPO, Світового банку, Європейської комісії, ООН та Уряду України в межах RDNA. Сукупність джерел забезпечила охоплення економічного, соціального, цифрового, інституційного та відновлювального вимірів. Результати проведеного аналізу систематизовано в табл. Б.1, додаток Б.

Отримані результати підтверджують доцільність саме багатовимірного представлення. Узагальнення результатів тенденцій трансформації передумов економіко-цифрового управління будівельними підприємствами в умовах біосферосумісного розвитку у 2021–2025 рр. виявляє неузгодженість між відновленням окремих економічних показників і станом інших складових середовища. У 2025 р. номінальний обсяг виконаних будівельних робіт практично повернувся до рівня 2021 р. – 258,2 проти 258,1 млрд грн, тоді як введення житла залишалося нижчим на 15,8 %, а кількість введених квартир та індивідуальних житлових будинків – на 22,5 %. Отже, відновлення вартісного масштабу будівельної діяльності ще не означає відтворення її

соціально-функціональної результативності. Одночасно зниження індексу цін на будівельно-монтажні роботи зі 120,4 до 105,6 % свідчить про послаблення цінового тиску, але не усуває накопичених структурних обмежень.

Цифровий вимір демонструє швидшу позитивну траєкторію: використання CRM зросло з 3,0 до 8,7 %, кількість підприємств електронної торгівлі – до 3173, а обсяг електронних продажів – до 703,47 млрд грн. Водночас індекс цифрової управлінської інтегрованості у 2025 р. становить 22,84 пункту, що засвідчує розрив між поширенням окремих цифрових каналів і формуванням цілісної цифрової управлінської моделі. Подібна асиметрія простежується в інституційному вимірі: індекс цифрово-інституційної готовності зріс з 59,05 до 71,41 пункту, тоді як індекс збалансованості цифрово-інституційного середовища знизився до 35,56 пункту, а позиція України за інституційною складовою Глобального інноваційного індексу погіршилася з 91-го до 108-го місця.

Резильєнтний вимір підсилює цю інтерпретацію: кумулятивні потреби відновлення та реконструкції досягли 587,7 млрд дол. США, а прямі збитки – 195,1 млрд дол. США. Масштаб управлінського завдання істотно перевищує безпосередню вартість фізичних руйнувань, оскільки відновлення охоплює модернізацію, відтворення функціональності, адаптацію інфраструктури та довгострокові вимоги до стійкості. Сукупне прочитання п'яти вимірів характеризує середовище як асинхронно трансформоване, оскільки їхня динаміка не формує збалансованої траєкторії.

Отримані результати формують методологічну передумову для переходу від характеристики середовища до оцінювання способів адаптації підприємств-стейкхолдерів. Виявлені дисбаланси слід трактувати як зовнішні умови, що змінюють фінансові, операційні, цифрові, організаційні та екосистемні параметри стійкості підприємства. Тому наступний етап аналізу має встановити, яким чином різні поєднання резервів, ресурсів, даних, компетентностей і взаємодії зі стейкхолдерами формують відмінні стани адаптації до галузевого середовища, що створює підстави для подальшої

побудови методологічної архітектоніки стійкості й резильєнтності підприємств-стейкхолдерів проєктів біосферосумісного будівництва.

Сукупний аналіз економічного, соціального, цифрового, інтеграційно-інституційного та результативного вимірів показує, що середовище функціонування підприємств-стейкхолдерів характеризується не односпрямованим відновленням, а асинхронною трансформацією його складових. Відновлення окремих виробничих показників відбувається одночасно зі збереженням значного соціального та відновлювального навантаження, прискоренням цифровізації й нестійкістю інституційної спроможності. Така конфігурація виключає можливість оцінювати резильєнтність підприємства за одним контуром і обґрунтовує необхідність багатокомпонентної діагностики, в якій зовнішні показники виконують функцію контекстних змінних для подальшої оцінки економічної результативності, цифрової зрілості, біосферосумісної ефективності та організаційно-інноваційної стійкості підприємств-стейкхолдерів [261]

На цій основі пропонується розрізняти три стани адаптації підприємства до галузевого середовища. Компенсаційна адаптація підтримує виконання поточних зобов'язань за рахунок резервів, скорочення витрат або перенесення інвестицій. Реконфігураційна адаптація змінює портфель, структуру ресурсів і партнерські зв'язки. Трансформаційна резильєнтність формує нову модель діяльності, у якій цифрові дані, життєвоциклове управління і біосферосумісні критерії стають постійними елементами прийняття рішень. Лише третій стан забезпечує не повернення до попередньої конфігурації, а перехід до якісно вищої спроможності.

Отримані результати формують методологічний перехід до індикативно-критеріальної системи оцінювання. Виробничо-циклічні й структурні показники мають використовуватися як контекстні змінні; інвестиційні, трудові та фінансові характеристики – як джерела критеріїв економічної результативності й організаційно-інноваційної стійкості; потреба у простежуваності реконструкції та інфраструктурних проєктів – як

обґрунтування показників цифрової зрілості; життєвоциклові наслідки відновлення – як підстава для показників екологічної та біосферосумісної ефективності.

Контурна модель відокремлює зовнішній діагностичний фон від внутрішньої оцінки підприємства. Такий поділ запобігає помилковому трактуванню позитивного темпу з низької бази, номінального зростання під впливом цін або короткострокової прибутковості як достатньої ознаки резильєнтності.

Інформаційно-цифрова стійкість визначає здатність підприємства забезпечувати повноту, достовірність, своєчасність, сумісність і захищеність даних, необхідних для прийняття рішень упродовж життєвого циклу будівельного об'єкта. Наявність програмного забезпечення не є достатньою ознакою такої стійкості, оскільки управлінський ефект виникає лише за узгодженості цифрових інструментів із процесами, ролями, правилами верифікації та відповідальністю за інформацію.

BIM, спільне середовище даних, цифрові двійники й аналітичні засоби переводять частину управління з постфактум контролю до попереджувального аналізу. Позитивний вплив залежить від стандартизації даних, договірного закріплення інформаційних зобов'язань, політик доступу, резервування та здатності відновлювати критичні інформаційні функції [8; 10; 11; 18–21].

Українські та міжнародні дослідження підтверджують, що цифрова стійкість має технологічний, організаційний, компетентнісний і міжорганізаційний виміри. Цифрова платформа не усуває фрагментацію, якщо дані дублюються, рішення не мають відповідального власника, персонал не володіє необхідними компетентностями, а учасники проєкту не працюють за спільними правилами [80–86; 91–93].

Підсистеми інформаційно-цифрової стійкості та їх управлінське значення наведено в табл. 2.5.

Підсистеми інформаційно-цифрової стійкості підприємства-стейкхолдера

Підсистема	Зміст	Управлінське значення
Інфраструктурна	Наявність цифрових платформ, спільного середовища даних, інформаційних моделей, інтегрованих реєстрів	Забезпечує доступність інформації та технологічну основу координації
Управлінська	Регламенти роботи з даними, власники інформації, правила оновлення, процедури верифікації	Перетворює цифрові дані на управлінський ресурс
Компетентнісна	Рівень цифрових навичок персоналу, здатність працювати з моделями, аналітикою і цифровими процедурами	Зменшує опір змінам і підвищує якість рішень
Безпекова	Політики кіберзахисту, резервне копіювання, контроль доступу, план відновлення після інцидентів	Підтримує безперервність діяльності та захищає критичні дані
Екосистемна	Сумісність даних між учасниками, договірне закріплення інформаційних зобов'язань, спільні правила обміну	Забезпечує простежуваність рішень між заінтересованими сторонами

Джерело: розроблено автором на основі [8; 10; 11; 18–21; 80; 84–86; 91–93].

Систематизація показує, що цифрова резильєнтність виникає за одночасної доступності інфраструктури, регламентованого врядування даними, достатніх компетентностей, кіберзахисту та міжорганізаційної сумісності. Відсутність будь-якої з підсистем формує некомпенсаційне обмеження, яке може зупинити проєктний процес незалежно від стану інших компонентів.

Методологічна конфігурація стійкості підприємства-стейкхолдера охоплює шість взаємопов'язаних складових: фінансову, операційну, інвестиційно-інноваційну, організаційну, інформаційно-цифрову та екосистемну. Їх поєднання узгоджує традиційну економічну діагностику з вимогами цифрового управління, життєвого циклу та мережевої координації.

Фінансова складова забезпечує ліквідність, автономію та ресурс для виконання зобов'язань. Операційна відображає безперервність робіт, якість, безпеку й керованість постачання. Інвестиційно-інноваційна визначає спроможність оновлювати технології та процеси [268]. Організаційна характеризує структуру, культуру, компетентності й здатність до навчання.

Інформаційно-цифрова забезпечує доказовість, інтеграцію та захист даних. Екосистемна відображає надійність партнерських зв'язків, узгодження інтересів і спільне управління ризиками. Зміст і функції складових систематизовано в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Складові інтегральної стійкості підприємства-стейкхолдера

Компонент	Зміст	Функція у системі стійкості
Фінансова	Платоспроможність, ліквідність, автономія, здатність фінансувати проекти	Забезпечує ресурсну основу життєздатності
Операційна	Безперервність робіт, контроль строків, якість, безпека, постачання	Підтримує виконання проектних зобов'язань
Інвестиційно-інноваційна	Оновлення технологій, впровадження цифрових рішень, розвиток виробничої бази	Формує здатність до довгострокового розвитку
Організаційна	Структура управління, культура, компетентності, лідерство, здатність до навчання	Створює поведінкову і управлінську основу адаптації
Інформаційно-цифрова	Якість даних, цифрова інтеграція, інформаційна безпека, аналітика	Забезпечує доказовість рішень і раннє виявлення ризиків
Екосистемна	Надійність партнерських зв'язків, взаємодія із заінтересованими сторонами, договірна координація	Підвищує здатність підприємства діяти в мережевому середовищі

Джерело: розроблено автором на основі [31; 72–75; 80–93].

Взаємозалежність складових означає, що загальна стійкість не дорівнює їх механічній сумі. Фінансова рівновага є короточасною за низької операційної керованості; інноваційні інвестиції не забезпечують результату без організаційної готовності; екосистемна координація втрачає надійність за фрагментованих даних. Тому подальше оцінювання має зберігати компонентний профіль і не допускати повної компенсації критичного дефіциту високими значеннями інших складових. Методологічно це зумовлює необхідність установавання граничних значень для критичних компонентів, порушення яких має обмежувати підсумкову оцінку незалежно від позитивної динаміки інших параметрів. Така некомпенсаційна логіка дає змогу виявляти приховані дисбаланси стійкості та формувати адресні управлінські рішення щодо саме тих складових, які визначають здатність підприємства-

стейхолдера зберігати функціональність і адаптуватися до змін проєктного середовища.

Орієнтовну систему показників, яка операціоналізує шість складових, наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Система показників оцінювання стійкості підприємства-стейхолдера в умовах цифрової економіки

Компонент	Група показників	Приклади індикаторів
Фінансова	Ліквідність, автономія, фінансова стійкість, рентабельність	Коефіцієнт поточної ліквідності; коефіцієнт автономії; рентабельність операційної діяльності; співвідношення власного і залученого капіталу
Операційна	Безперервність виконання робіт, ресурсна керованість, якість, дотримання строків	Відхилення фактичних строків від планових; частка виконаних робіт без переробок; рівень простоїв; частота зривів постачання
Інвестиційно-інноваційна	Оновлення ресурсної бази та здатність фінансувати зміни	Частка інвестицій у цифровізацію; коефіцієнт реінвестування; частка модернізованих процесів; кількість впроваджених управлінських інновацій
Організаційна	Керованість структури, компетентності персоналу, здатність до навчання	Рівень стандартизації процесів; частка персоналу, що пройшла навчання; плинність кадрів; наявність планів реагування на збої
Інформаційно-цифрова	Якість, доступність, сумісність і захищеність цифрових даних	Частка процесів, переведених у цифровий формат; рівень інтеграції цифрових систем; кількість інцидентів інформаційної безпеки; час відновлення доступу до даних
Екосистемна	Надійність взаємодії із заінтересованими сторонами та простежуваність спільних рішень	Частка партнерів, підключених до спільного середовища даних; своєчасність погоджень; кількість договірних спорів; рівень виконання інформаційних зобов'язань

Джерело: удосконалено автором на основі [21; 31; 87–93].

Запропонована система поєднує результативні й спроможні індикатори. Фінансові та операційні показники відображають поточну життєздатність, тоді як інвестиційно-інноваційні, організаційні, цифрові й екосистемні показники фіксують потенціал передбачення, адаптації та реконфігурації. Така модульність створює основу для подальшого нормування й інтегрального оцінювання без втрати інформації про джерело вразливості.

Цифрова трансформація виконує функцію інтеграційного механізму резильєнтності, коли наскрізний контур даних поєднує планування, проєктування, кошторисування, закупівлі, будівельне виробництво, контроль якості, безпеку, екологічні параметри, експлуатацію й звітність. За такої конфігурації управління переходить від реактивної фіксації відхилень до раннього виявлення ризиків і сценарного коригування.

Емпіричні дослідження показують, що результативність цифрових технологій залежить від здатності підприємства змінювати процеси, ролі, правила взаємодії та відносини з партнерами [80; 83; 84]. Цифрові двійники підтримують прогнозування стану активу, а захищені цифрові реєстри підвищують простежуваність транзакцій, проте їхній ефект обмежується якістю даних і зрілістю реляційного врядування [85; 86].

Внесок окремих цифрових інструментів у стійкість систематизовано в табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Вплив цифрових технологій на складові стійкості підприємства-стейкхолдера

Цифровий інструмент	Управлінський зміст	Внесок у стійкість
Інформаційне моделювання будівель	Формування узгодженої моделі об'єкта і даних про життєвий цикл	Зменшення помилок, прозорість рішень, узгодження проєктних змін
Спільне середовище даних	Єдиний порядок збереження, погодження і оновлення документації	Скорочення інформаційних втрат, підзвітність учасників, швидше реагування
Цифрові двійники	Відображення стану об'єкта або процесу з можливістю аналізу змін	Прогнозування збоїв, підтримка експлуатаційної стійкості
Аналітика великих масивів даних	Виявлення закономірностей у витратах, строках, постачанні та ризиках	Раннє попередження відхилень, обґрунтування сценаріїв
Штучний інтелект	Автоматизована підтримка прогнозування, планування і контролю	Підвищення точності управлінських рішень за умови якості даних
Цифрові реєстри та захищені транзакції	Фіксація рішень, платежів, постачань і відповідальності	Зниження спорів, прозорість ланцюгів постачання, довіра між учасниками

Джерело: узагальнено автором на основі [8; 10; 11; 18; 80; 84–86].

Технології підсилюють резильєнтність лише за їх включення до управлінського циклу. BIM і спільне середовище даних підтримують узгодження, цифровий двійник – прогнозування й відновлення, аналітика та штучний інтелект – передбачення й сценарний вибір, цифрові реєстри – довіру та підзвітність. Інструментальна цифровізація без зміни процесів не створює сталої здатності до реагування.

Динамічний вимір резильєнтності розкривається послідовністю «передбачення – реагування – реконфігурація – трансформація». Передбачення охоплює сканування середовища, раннє виявлення відхилень і сценарне оцінювання. Реагування забезпечує локалізацію впливу, збереження критичних функцій і узгоджений перерозподіл ресурсів. Реконфігурація спрямована на відновлення керованості, зміну портфеля, команд, постачання, даних і контрактних зв'язків. Трансформація закріплює нові правила, компетентності й цифрову архітектуру, перетворюючи досвід збурення на якісно вищу проєктну спроможність.

Синтез теоретичних положень і галузевих результатів дає підстави визначити резильєнтність підприємства-стейкхолдера як інтегральну динамічну здатність підтримувати функціональну цілісність, зберігати критичні проєктні функції, реконфігурувати ресурси, компетентності, дані та міжорганізаційні зв'язки, відновлювати керованість і трансформувати модель діяльності відповідно до нових параметрів проєктної екосистеми.

Методологічний конструкт поєднує шість складових стійкості з чотирма динамічними компонентами резильєнтності та зовнішнім контекстним вектором галузевого середовища. Його архітектуру подано на рис. 2.11. Фінансова, операційна, інвестиційно-інноваційна, організаційна, інформаційно-цифрова й екосистемна складові формують ресурсно-функціональну основу, тоді як передбачення, реагування, реконфігурація й трансформація визначають спосіб її зміни під впливом збурень. Адаптивний зворотний зв'язок переводить результати кожного циклу в оновлені правила, дані та управлінські здатності.

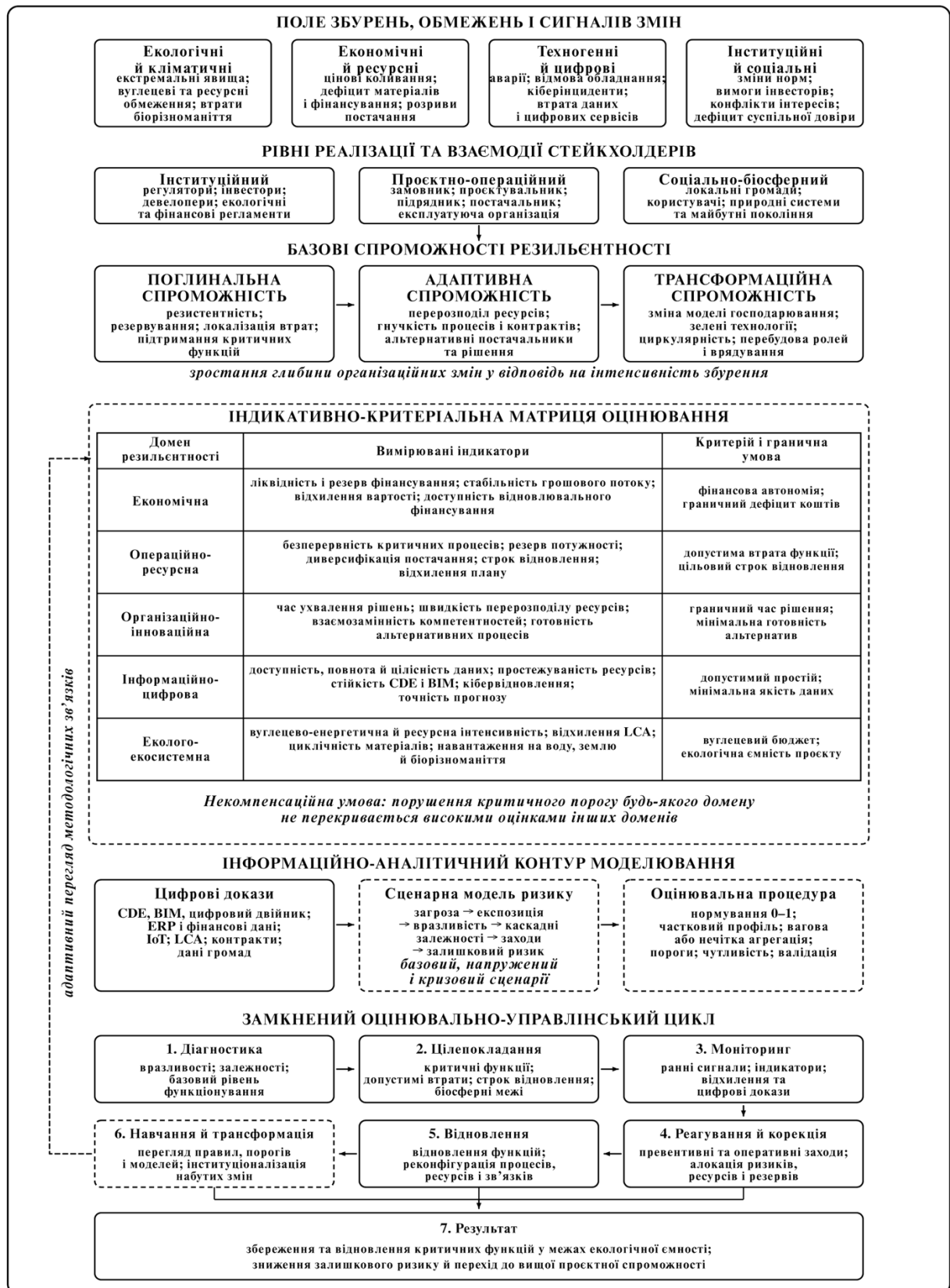


Рис. 2.11. Методологічний конструкт резильєнтності підприємства-стейкхолдера проєкту біосферосумісного будівництва

Джерело: розроблено автором.

Практичне застосування методологічного конструкта резильєнтності передбачає його використання як основи для діагностики здатності підприємства-стейкхолдера зберігати проєктну спроможність, адаптувати конфігурацію ресурсів і зв'язків та відновлювати виконання зобов'язань за умов зовнішніх і внутрішніх збурень. На початковій стадії для кожного учасника проєктної екосистеми оцінюються фінансова, операційна, інвестиційно-інноваційна, організаційна, інформаційно-цифрова та екосистемна складові. Оцінювання охоплює не лише поточний стан підприємства, а й наявність резервів, альтернативних ресурсних каналів, цифрових даних, компетентностей, процедур безперервності діяльності та партнерських зв'язків, які можуть бути активовані у кризовій ситуації.

На основі отриманого профілю визначаються критичні обмеження підприємства та його спроможність реалізовувати послідовність динамічних компонент «передбачення – реагування – реконфігурація – трансформація». Передбачення охоплює виявлення ранніх сигналів відхилень, сценарне оцінювання ризиків і формування резервних планів. Реагування передбачає оперативне залучення фінансових, матеріальних, кадрових та інформаційних ресурсів для локалізації наслідків збурення. Реконфігурація полягає у зміні процесів, ланцюгів постачання, розподілу функцій, відповідальності та цифрових потоків між учасниками. Трансформація забезпечує закріплення нової, більш стійкої конфігурації діяльності через оновлення технологій, компетентностей, організаційних правил і моделей взаємодії.

У проєктній практиці конструкт може застосовуватися під час попереднього добору підрядників і постачальників, розподілу ролей між підприємствами-стейкхолдерами, формування контрактних вимог, визначення резервів, розроблення сценаріїв безперервності та встановлення порогів управлінського реагування. Наприклад, низька фінансова резильєнтність учасника обґрунтовує необхідність додаткових гарантій, страхових механізмів або резервного виконавця; недостатня інформаційно-цифрова спроможність потребує встановлення вимог до структури,

періодичності та верифікації даних; слабка екосистемна складова вказує на ризик порушення координації та необхідність формалізації альтернативних каналів постачання, комунікації й заміщення функцій.

Під час реалізації проєкту методологічний конструкт доцільно інтегрувати зі спільним середовищем даних, реєстром ризиків, календарним графіком, бюджетом і системою показників підприємства. Досягнення критичного порога за строками, вартістю, ресурсним забезпеченням, якістю даних або виконанням зобов'язань має запускати заздалегідь визначену процедуру: уточнення ризику, активування резерву, зміну відповідального учасника, перерозподіл ресурсів, перегляд графіка чи застосування альтернативного технологічного рішення. Після стабілізації ситуації оцінюються тривалість відновлення, обсяг втрат, повнота виконання функцій і результативність застосованої конфігурації.

Практичним результатом стають раннє виявлення вразливостей, обґрунтований добір учасників, адресний розподіл резервів і відповідальності, скорочення часу реагування, зниження сукупних втрат та збереження функціональної цілісності проєктної екосистеми. Водночас компонентний профіль дає змогу уникнути усередненої оцінки: достатній загальний стан підприємства не приховує критичного дефіциту окремої складової, яка за конкретного сценарію може обмежити реалізацію всього проєкту.

Проведений аналіз встановив асиметричний характер відновлення будівельної галузі. Позитивні річні індекси 2023–2024 років відображають зростання з низької бази, тоді як кумулятивний фізичний обсяг у 2024 році становив близько 52,2 % рівня 2021 року. Номінальне наближення до довоєнного рівня відбувається швидше за реальне відновлення, тому вартісні показники без урахування цінового й структурного контексту не можуть бути достатньою основою оцінювання.

Структура попиту зміщується до інженерних, нежитлових, ремонтних і реконструкційних робіт. Одночасно інвестиційна та кадрова база відновлюється повільніше за поточну виробничу активність, а позитивне

фінансове сальдо поєднується зі значною часткою збиткових підприємств. Виявлена конфігурація підвищує вимоги до цифрової сумісності, життєвоциклової простежуваності, компетентнісного резерву, договірної координації та здатності перерозподіляти ресурси без втрати керованості.

2.2. Інноваційно-екологічна корпоративна культура підприємств-стейкхолдерів: міжнародні моделі та напрями адаптації

Перехід від методологічного конструкта резильєнтності до обґрунтування культурних передумов економіко-цифрового управління зумовлений тим, що здатність підприємства передбачати збурення, реконфігурувати ресурси й трансформувати модель діяльності реалізується через повторювані норми поведінки. Цифрові платформи, екологічні стандарти, життєвоциклове оцінювання та інноваційні матеріали не набувають управлінської результативності, якщо персонал, керівники проєктів і зовнішні партнери не сприймають їх як обов'язкові правила формування рішень.

Наукова проблема полягає у невідповідності між внутрішньоорганізаційним трактуванням корпоративної культури та міжорганізаційною природою проєктів біосферосумісного будівництва. Екологічний результат створюється сукупністю юридично відокремлених підприємств, а наслідки проєктних рішень розподіляються між фазами проєктування, постачання, будівництва, експлуатації, реконструкції й демонтажу. За таких умов культурна узгодженість має охоплювати не лише цінності окремого підприємства, а й контрактні вимоги, цифрові правила обміну даними, критерії добору партнерів, процедури верифікації та розподіл відповідальності.

Завдання підрозділу полягає у систематизації міжнародних моделей інноваційно-екологічної корпоративної культури та адаптації їх положень до діяльності підприємств-стейкхолдерів шляхом узгодження ціннісного,

управлінсько-процедурного і поведінкового рівнів, європейської нормативної прозорості, азійської організаційної дисципліни та американської ринкової мотивації з потребами біосферосумісного відновлення України.

У межах дослідження інноваційно-екологічну корпоративну культуру підприємства-стейкхолдера визначено як відтворювану систему цінностей, управлінських норм, компетентностей, цифрових практик і механізмів взаємної відповідальності, що забезпечує включення екологічних цілей та інноваційних рішень у стратегічні, проєктні й операційні рішення протягом життєвого циклу будівельного активу [252]. Відмінною ознакою запропонованого визначення є перехід від декларативної прихильності до доказового режиму управління, у якому суттєва екологічна вимога має визначеного власника, джерело даних, контрольний показник, процедуру підтвердження та механізм коригування.

Методичну основу становлять порівняльний та інституційний аналіз, структурно-функціональна декомпозиція культури, зіставлення міжнародних регуляторних і сертифікаційних моделей, статистичний аналіз екоінноваційності, циркулярності, поширення екологічного менеджменту й цифрово-екологічних практик, а також концептуальне моделювання напрямів адаптації. Кількісні індикатори не ототожнюються з культурою безпосередньо; вони розглядаються як спостережувані прояви її інституціоналізації у рішеннях, даних і матеріальних потоках.

Корпоративна культура має латентну природу: її неможливо достовірно виміряти одним статистичним показником або встановити лише за наявністю політики. Зміст культури виявляється через сталість управлінських рутин, які визначають, які екологічні дані збираються, хто відповідає за їхню якість, як вони впливають на інвестиційний вибір і чи поширюються вимоги на постачальників та підрядників. Методологічна операціоналізація тому потребує одночасного врахування цінностей, процедур, компетентностей, даних, життєвоциклових рішень і стейкхолдерської узгодженості.

Структурну репрезентація інноваційно-екологічної корпоративної культури подано як вектор взаємопов'язаних компонентів:

$$\text{IECC} = \langle V, G, C, D, L, R \rangle, \quad (2.3)$$

де V – ціннісно-нормативна орієнтація на запобігання екологічній шкоді та створення довгострокової цінності;

G – управлінська інституціоналізація через політики, відповідальність, мотивацію і контроль;

C – компетентності персоналу та здатність до екологічних інновацій;

D – цифрове формування, інтеграція й верифікація даних;

L – життєвоциклове врахування енергії, вуглецю, матеріалів, експлуатації та демонтажу;

R – стейкхолдерська узгодженість вимог, контрактів і спільних рішень.

Компоненти вектора не є взаємозамінними. Висока екоінноваційна активність не компенсує відсутність простежуваності матеріалів, а сертифікована система менеджменту не гарантує життєвоциклового оцінювання проєктних альтернатив. Некомпенсаційність має принципове значення для будівництва, оскільки критичний дефіцит даних або відповідальності на ранній фазі може сформувати незворотні екологічні наслідки в експлуатації чи демонтажі.

Теоретичні підходи, що пояснюють формування інтегрованої культури, систематизовано у табл. 2.9.

Таблиця 2.9 показує, що жодна теоретична перспектива окремо не пояснює культурну трансформацію проєктної екосистеми. Організаційно-культурний рівень розкриває внутрішні норми, інституційний – зовнішні вимоги легітимності, ресурсний – значення знань і компетентностей, а культура сталого розвитку пов'язує поведінку з довгостроковими екологічними наслідками. Їх поєднання формує методологічну основу міжрівневого управління культурою.

Таблиця 2.9

**Наукові підходи до пояснення інтеграції інноваційної та екологічно
орієнтованої корпоративної культури**

Підхід	Наукове положення	Значення для будівельного підприємства	Обмеження без інтеграції
Організаційно-культурний	Культура визначає сталі припущення, цінності та норми поведінки персоналу [100]	Пояснює, чому однакові стандарти виконуються з різною якістю в різних підприємствах	Недостатньо враховує зовнішній інституційний тиск
Модель конкуруючих цінностей	Організаційна культура поєднує командність, ієрархію, ринкову орієнтацію та інноваційність [101]	Дозволяє оцінити баланс між контролем, результативністю та готовністю до змін	Не завжди розкриває екологічний зміст управлінських норм
Інституціональний	Поведінка підприємств формується під дією формальних правил, норм і очікувань легітимності [102–104]	Пояснює вплив держави, інвесторів, професійних об'єднань і громад	Потребує поєднання з внутрішніми управлінськими механізмами
Ресурсний	Культура, компетентності та знання є нематеріальними ресурсами, що впливають на результативність	Дозволяє трактувати культуру як джерело конкурентоспроможності	Може недооцінювати нормативні й екологічні обмеження
Культура сталого розвитку	Екологічні та соціальні цінності мають бути закріплені в управлінських процедурах [105]	Формує основу для довгострокової екологічної відповідальності	Потребує адаптації до проєктної специфіки будівництва

Джерело: сформовано автором на основі [100–105].

Для забезпечення методологічної зіставності міжнародного аналізу інноваційно-екологічну корпоративну культуру доцільно досліджувати як багаторівневу систему, виокремлюючи аналітичні рівні, що відображають специфіку її інституціоналізації, організаційного закріплення та практичної реалізації в різних країнах; їх зміст систематизовано в табл. 2.10.

Таблиця 2.10

Рівні спостереження інноваційно-екологічної корпоративної культури

Рівень	Аналітичний прояв	Основні індикатори	Методологічне обмеження
Макроінституційний	Спроможність інституцій підтримувати екологічні інновації	Індекс екоінновацій, ресурсоефективні результати	Не відображає безпосередньо практики будівельних підприємств
Матеріально-ресурсний	Фактичне заміщення первинних ресурсів вторинними	Коефіцієнт циркулярного використання матеріалів	Залежить від структури економіки, імпорту та накопичення матеріалів у довгострокових активах
Корпоративно-системний	Формалізація відповідальності, аудиту й постійного поліпшення	ISO 14001, EMAS, незалежна верифікація	Сертифікація не гарантує однакової глибини інтеграції у проєктні рішення
Операційно-цифровий	Використання цифрових систем для скорочення енергії та матеріалів	Частка підприємств, що застосовують відповідні ІКТ-рішення	Показує факт використання, але не якість даних і досягнутий екологічний ефект
Проєктно-життєвоцикловий	Інтеграція екологічних критеріїв у вибір проєктних альтернатив	LCA, LCC, GWP, Level(s), BIM-підтримка	Потребує об'єктних даних, гармонізованих правил і міжорганізаційної сумісності
Рівень	Аналітичний прояв	Основні індикатори	Методологічне обмеження
Макроінституційний	Спроможність інституцій підтримувати екологічні інновації	Індекс екоінновацій, ресурсоефективні результати	Не відображає безпосередньо практики будівельних підприємств

Джерело: систематизовано автором.

Розмежування рівнів у табл. 2.10 знижує ризик висновків, побудованих на одному сприятливому показнику. Макроінституційна спроможність не доводить зрілості окремого підприємства, а сертифікація не замінює об'єктних даних. Для економіко-цифрового управління потрібне поєднання зовнішнього контексту, корпоративних процедур, цифрових практик і життєвоциклових результатів.

Корпоративна культура будівельного підприємства є сукупністю формальних і неформальних норм, що визначають спосіб прийняття рішень, ставлення до ризику, характер командної взаємодії, якість навчання та відповідальність за наслідки діяльності. Проектний характер будівництва розширює сферу її дії: культура регулює не лише внутрішній соціальний клімат, а й поведінку учасників тимчасових міжорганізаційних команд.

Інноваційна складова характеризує готовність підприємства підтримувати пошук технологічних, організаційних і проектних рішень, сприймати обґрунтований ризик, накопичувати знання між проектами, використовувати цифрові дані й навчатися на помилках. Екологічна складова відображає внутрішнє прийняття відповідальності за ресурси, викиди, відходи, стан місцевих екосистем і майбутню експлуатацію об'єкта. Інтеграція складових підпорядковує технологічне оновлення не лише економічній ефективності, а й довгостроковій життєздатності активу.

Емпіричні дослідження будівельних підприємств підтверджують вплив типу культури на командну взаємодію, інноваційні спроможності та результативність [106–108]. Праці, присвячені циркулярним практикам і зеленій поведінці персоналу, показують, що культура посилює дію сприятливих чинників, але не усуває дефіцит фінансування, стандартизації або компетентностей без відповідної управлінської архітектури [109–111]. Відтак культурна зміна потребує стратегічного закріплення, організаційного дизайну, навчання, мотивації, цифрової прозорості та поширення вимог на партнерів.

Необхідність розглядати інноваційно-екологічну корпоративну культуру не лише як сукупність внутрішніх цінностей, норм і поведінкових практик підприємства, а як організаційний феномен, реалізація якого значною мірою визначається якістю зовнішнього інституційного середовища зумовлює здійснити аналіз екоінноваційної результативності.

Рівень екоінноваційної результативності країни відображає спроможність нормативної, фінансової, науково-технологічної та ринкової інфраструктури стимулювати впровадження ресурсоефективних технологій,

екологізацію бізнес-процесів і комерціалізацію екологічних інновацій. Тому її міжкраїнне порівняння дає змогу встановити, наскільки інституційні умови створюють стимули або обмеження для трансформації корпоративної культури підприємств-стейкхолдерів у напрямі інноваційності, екологічної відповідальності та біосферосумісної поведінки, а також виявити інституційні передумови, за яких відповідні цінності набувають форми стійких управлінських практик.

Індекс екоінновацій ЄС поєднує ресурси для екоінновацій, активність, результати, ресурсоефективність і соціально-економічні наслідки. За 2014–2024 роки його інтегральне значення зросло на 27,5 %, тоді як компонент ресурсоефективних результатів – на 62 % [122]. Випереджальна динаміка результативного компонента відображає зміщення інституційного середовища від підтримки факту інновації до вимірювання її матеріального та вуглецевого ефекту.

Для підприємств-стейкхолдерів така зміна означає переорієнтацію корпоративної відповідальності: інноваційність має оцінюватися не за придбанням технології, а за здатністю зменшити ресурсоемність, викиди й сукупний вплив об'єкта. Культурною нормою стає доказове зіставлення проєктних альтернатив за життєвоцикловою результативністю.

Міждержавна асиметрія екоінноваційної результативності засвідчує, що спільна регуляторна рамка не автоматично формує однакові корпоративні практики. Результат залежить від інноваційної спроможності підприємств, структури промисловості, якості інституцій та доступу до капіталу [122]. Адаптація міжнародних вимог тому має поєднувати нормативну сумісність з розвитком організаційної здатності їх виконувати.

Для біосферосумісного будівництва коефіцієнт циркулярного використання матеріалів набуває особливого методологічного значення, оскільки будівельний сектор не лише споживає значні обсяги первинних ресурсів, а й акумулює їх у довгострокових активах на десятиліття [164]. Тому оцінювання циркулярності має відображати не лише обсяг перероблених

відходів, а здатність проєктної екосистеми зберігати матеріальну й функціональну цінність ресурсів упродовж життєвого циклу об'єкта шляхом повторного використання конструктивних елементів, вторинного застосування матеріалів, проєктування для розбирання, ремонтпридатності та повернення компонентів у наступні виробничі цикли. Коефіцієнт циркулярного використання матеріалів у цьому контексті характеризує частку матеріального попиту, задоволену ресурсами, повторно введеними у господарський обіг, тоді як сам показник перероблення відходів не дає змоги встановити, чи збережено первісну функціональність, технічні властивості та економічну цінність матеріалу. Отже, для оцінювання біосферосумісності принципним стає перехід від логіки «утворення відходів – перероблення» до життєвоциклової логіки «ресурс – будівельний актив – збереження цінності – повторне використання – новий цикл», що безпосередньо характеризує здатність будівництва зменшувати видалення первинних природних ресурсів і матеріальне навантаження на біосферу.

У ЄС коефіцієнт циркулярного використання матеріалів зріс з 8,2 % у 2004 році до 12,2 % у 2024 році. Ретроспективний темп залишається нижчим за траєкторію, необхідну для досягнення орієнтира подвоєння циркулярності до 2030 року [123; 124]. Прискорення потребує зміни проєктування, закупівель, технічних специфікацій, ринків вторинної сировини та цифрової простежуваності. Динаміку загальноєвропейського показника відображено на рис. 2.12, який відображає поступове, однак поки недостатнє замикання матеріальних потоків, що свідчить про збереження значного потенціалу повторного використання будівельних матеріалів і компонентів у межах їх життєвого циклу. Для підприємства-стейкхолдера це зумовлює необхідність переходу від епізодичного використання вторинних матеріалів до нормативно закріплених процедур проєктування для розбирання, матеріальної паспортизації та контролю залишкової цінності активів. Така трансформація передбачає включення параметрів повторного використання, ремонтпридатності, демонтажу та відновлення матеріальної цінності до

проектних, закупівельних і експлуатаційних рішень підприємства. У результаті циркулярність матеріальних потоків набуває статусу керованої характеристики проекту, що дає змогу зменшувати ресурсомісткість будівництва, скорочувати обсяги відходів і формувати економічні стимули для

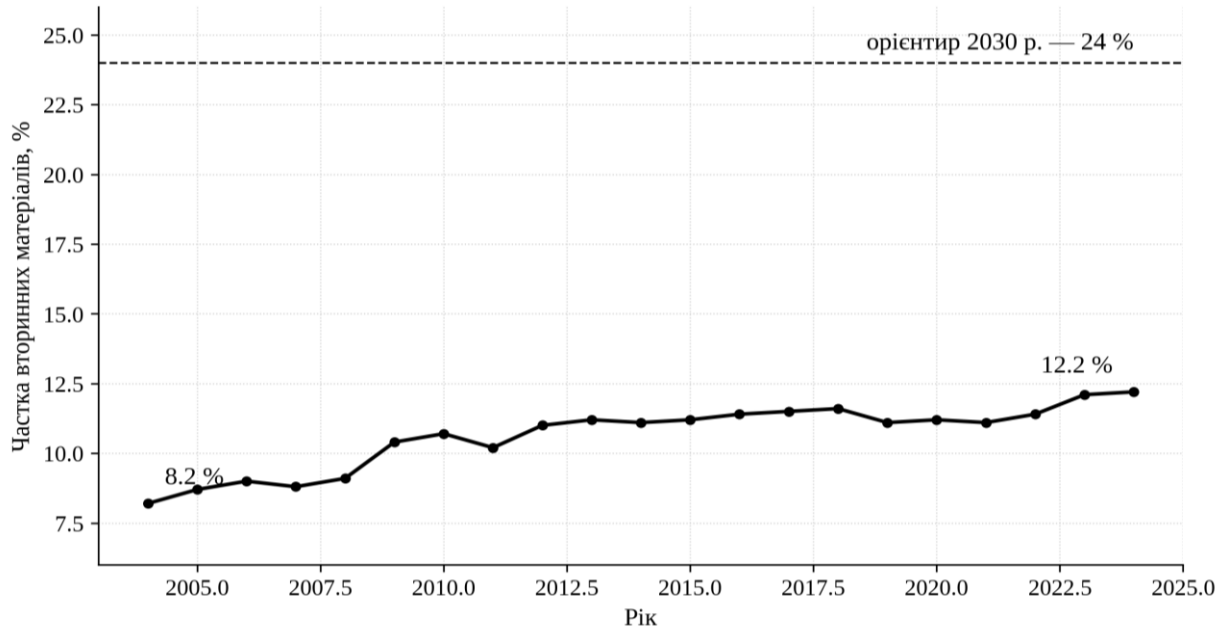


Рис. 2.12. Динаміка коефіцієнта циркулярного використання матеріалів у ЄС у 2004–2024 роках

Джерело: побудовано автором за даними [123; 124].

Міждержавне зіставлення засвідчує суттєву диференціацію траєкторій циркулярного використання матеріалів: Нідерланди, Бельгія та Італія демонструють відносно високі значення показника, тоді як для Польщі й Фінляндії характерними є його нижчий рівень або тенденція до скорочення [123]. Така неоднорідність свідчить, що екоінноваційність і циркулярність не можуть розглядатися як взаємозамінні критерії екологічної трансформації економіки. Екоінноваційність характеризує спроможність економічних суб'єктів генерувати та впроваджувати технологічні, організаційні й управлінські рішення екологічного спрямування, тоді як циркулярність відображає фактичний ступінь їх інтеграції у процеси використання, повторного залучення та замикання матеріальних потоків. Відповідно, високий рівень інноваційної активності не гарантує пропорційного зростання циркулярності без сформованих економічних стимулів, нормативних

механізмів і спроможності підприємств трансформувати інновації у сталі моделі ресурсокористування. Динаміку циркулярного використання матеріалів у країнах Європи подано на рис. 2.13.

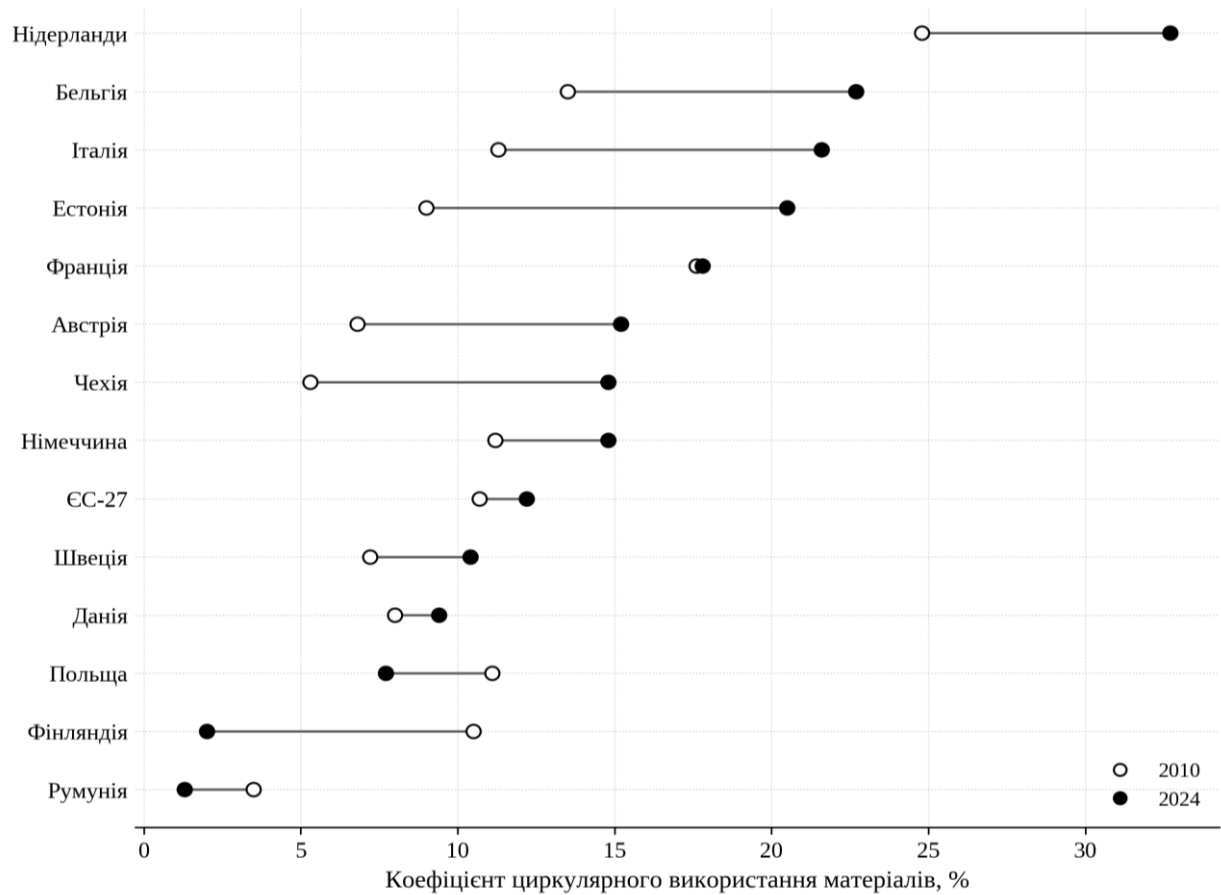


Рис. 2.13. Зміна циркулярності матеріальних потоків у вибраних країнах ЄС у 2010–2024 роках

Джерело: побудовано автором за даними [123].

Рис. 2.13 виявляє, що результат залежить не лише від технологій перероблення, а й від інституційної архітектури ринку, стандартів якості, практик закупівель та довіри до вторинних ресурсів. Для українських підприємств пряме копіювання показників країн-лідерів без формування відповідної інфраструктури створюватиме ризик формальної звітності без зміни матеріальних потоків.

Деталізація за групами матеріалів показує найвищу циркулярність металевих руд і значно нижчу – неметалевих мінералів, що охоплюють основні масові будівельні матеріали [125]. Майже незмінна траєкторія

неметалевих мінералів у 2010–2024 роках вказує на потребу в роздільному демонтажі, паспортизації матеріалів, технічних специфікаціях вторинної сировини та цифровій верифікації походження.

Структуру циркулярності за групами матеріалів наведено на рис. 2.14.

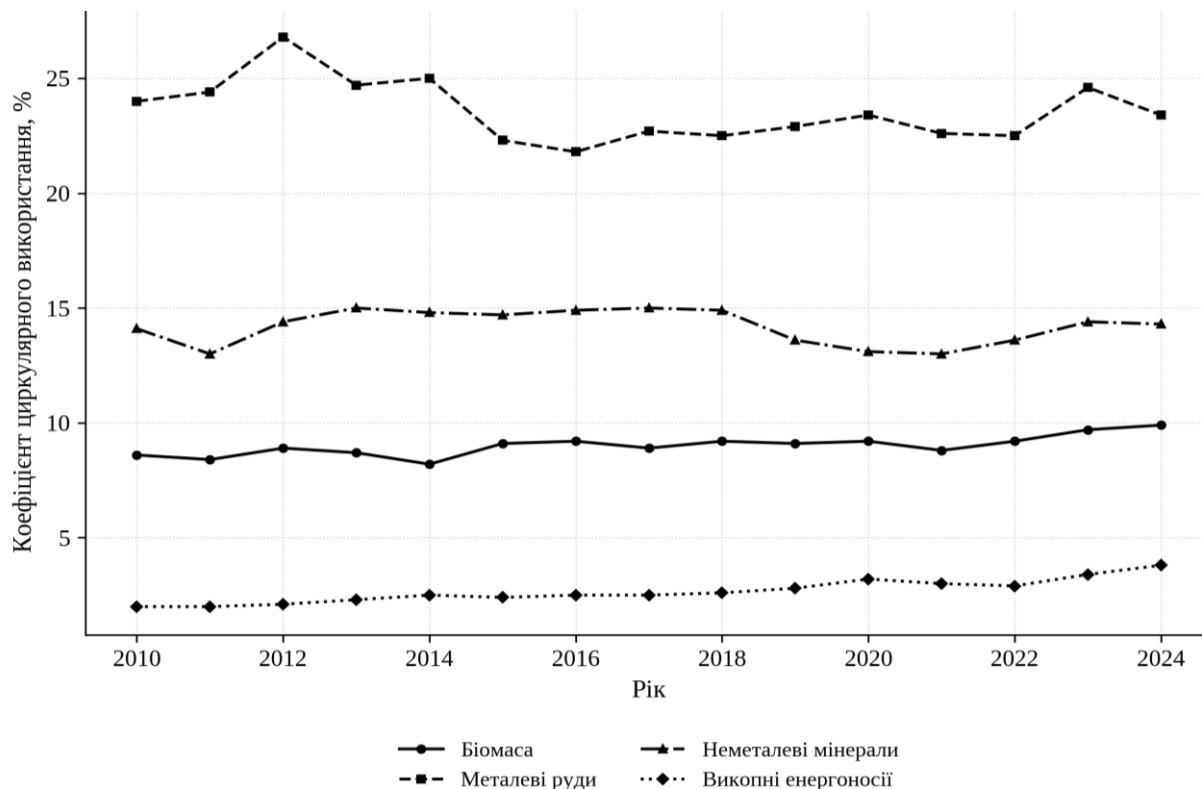


Рис. 2.14. Циркулярність основних груп матеріалів у ЄС у 2010–2024 роках

Джерело: побудовано автором за даними [125].

Рис. 2.14 доводить обмеженість загального індикатора циркулярності для оцінювання будівельної екосистеми. Управлінська діагностика має відокремлювати матеріальні групи та якість повторного використання, оскільки низькоякісне застосування подрібнених матеріалів не тотожне збереженню функціональної цінності ресурсів.

Відходи будівництва і знесення формують понад третину відходів ЄС, а рівні перероблення та матеріального відновлення істотно відрізняються між країнами [128]. Показник перероблення тому слід доповнювати ознаками вибіркового демонтажу, повторного використання компонентів, верифікованих технічних характеристик та збереження вартості матеріалу.

Системи екологічного менеджменту закріплюють відповідальність керівництва, процедури ідентифікації аспектів, цілі, моніторинг, внутрішній аудит і коригувальні дії. Чинна редакція ISO 14001:2026 формує міжнародно визнану основу екологічного менеджменту [126], тоді як Система екологічного менеджменту та аудиту (англ. Eco-Management and Audit Scheme (EMAS)) доповнює управлінську систему відкритою екологічною декларацією та зовнішньою верифікацією.

Станом на листопад 2024 року EMAS охоплювала 4 101 організацію та 17 208 майданчиків; найбільшу кількість зареєстрованих організацій мали Німеччина, Італія та Іспанія [127]. Поширення схеми у спеціалізованому будівництві, будівництві будівель, управлінні відходами та сервісах для об'єктів підтверджує її релевантність для проєктних екосистем.

Розподіл реєстрацій EMAS у країнах Європи наведено на рис. 2.15.

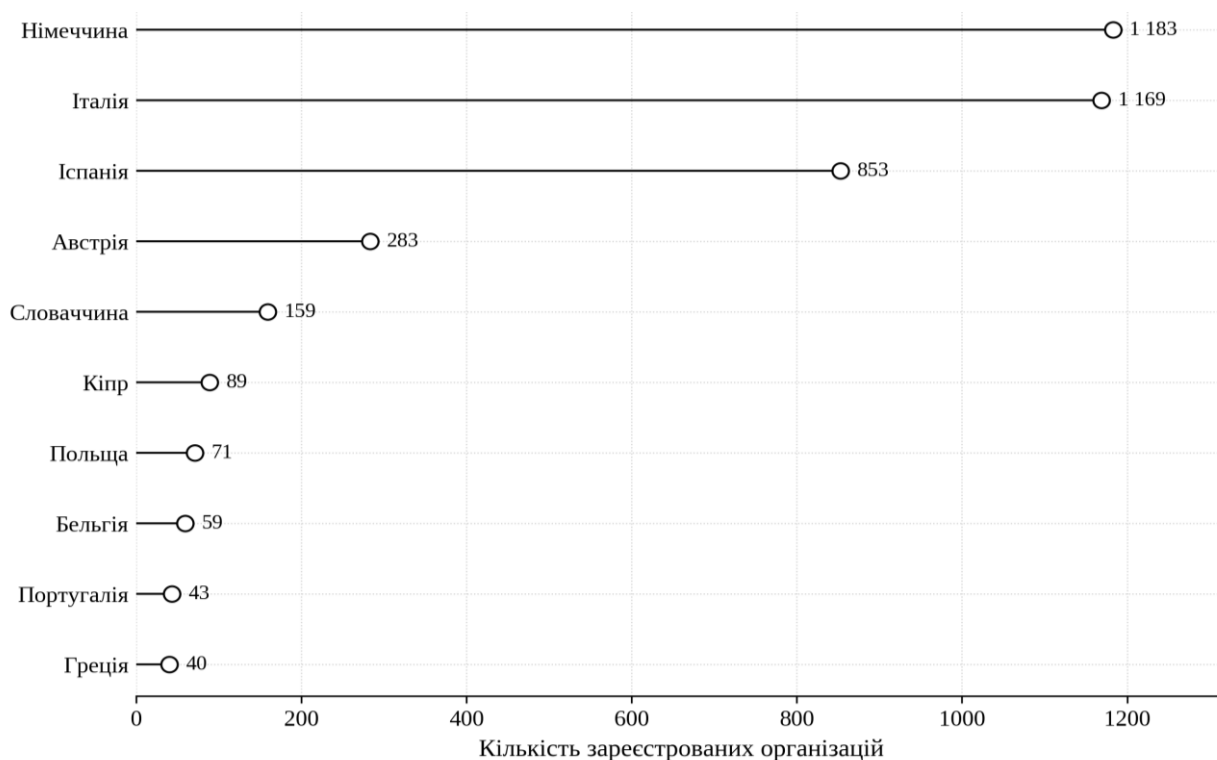


Рис. 2.15. Поширення EMAS у вибраних європейських країнах

Джерело: побудовано автором за даними [127].

Рис. 2.15 характеризує інституційне поширення верифікованого екологічного менеджменту, однак не може трактуватися як прямий рейтинг зрілості корпоративної культури. Кількість реєстрацій залежить від

державного стимулювання, публічних закупівель, структури підприємств і визнання схеми ринком. Сертифікація формує мінімальну процедурну платформу, але життєвоцикловий результат потребує об'єктних показників і контрактного поширення вимог на ланцюг постачання.

Культурною ознакою зрілості є здатність відтворити доказовий ланцюг «вимога – показник – джерело даних – відповідальний – верифікація – управлінське рішення». Така конструкція знижує ризик символічної екологічності й забезпечує порівнюваність результатів між підприємствами-стейкхолдерами.

Цифрово-екологічні практики як операційне втілення корпоративної культури

Цифровізація набуває екологічного змісту тоді, коли інформаційні системи змінюють параметри використання енергії, матеріалів і обладнання. Наявність ERP, BIM або хмарної платформи не доводить екологічної зрілості без включення екологічних показників у планування, закупівлі, моніторинг, контроль відхилень та обґрунтування проєктних альтернатив.

За даними Євростату, у 2025 році частки підприємств, які застосовували цифрові рішення для скорочення енергоспоживання та матеріалів, істотно відрізнялися за розміром. Великі підприємства мали значно вищі показники, ніж малі, що відображає нерівність інвестиційних можливостей, компетентностей і зрілості управління даними [129].

Розрив за розміром підприємств відображено на рис. 2.16, який показує, що культурна трансформація малих підприємств не може спиратися лише на добровільне придбання технологій. Проєктна екосистема потребує мінімальних форматів даних, типових цифрових шаблонів, платформної підтримки та пропорційних процедур, які дозволяють малим підприємцям виконувати екологічні інформаційні зобов'язання без надмірних трансакційних витрат.

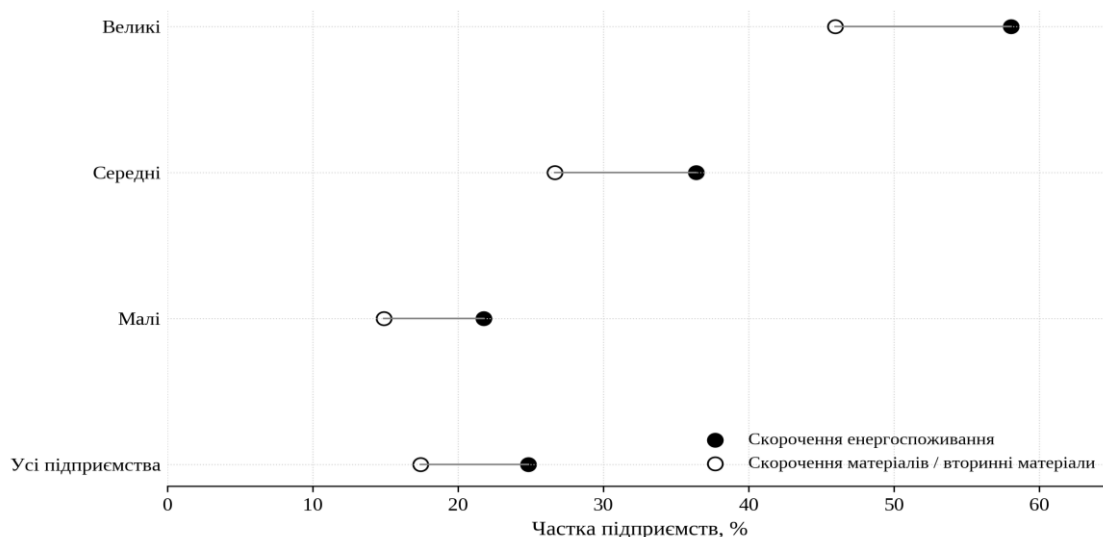


Рис. 2.16. Використання цифрових рішень для екологічних цілей підприємствами ЄС за розміром у 2025 році

Джерело: побудовано автором за даними [129].

Будівництво має нижчі за середні по ЄС показники використання цифрових рішень для екологічних цілей, ніж переробна промисловість, енергопостачання, водопостачання й управління відходами [130]. Відставання є методологічно значущим через матеріало- та енергоємність життєвого циклу будівельних активів.

Аналіз галузевого зіставлення подано на рис. 2.17.

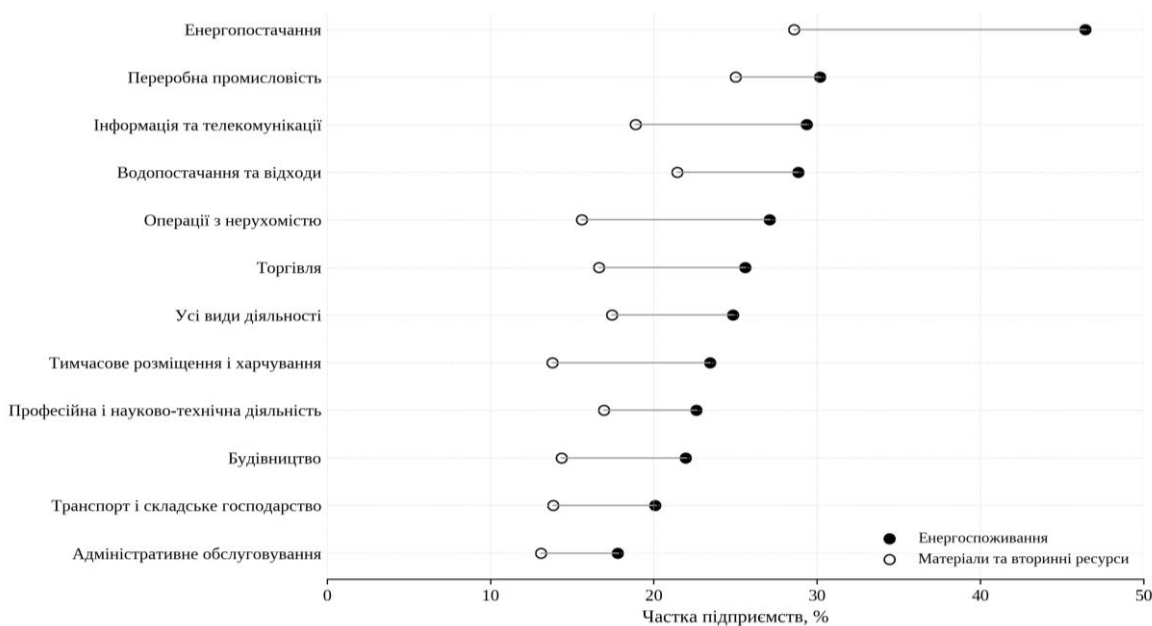


Рис. 2.17. Цифрово-екологічні практики підприємств ЄС за видами економічної діяльності у 2025 році

Джерело: побудовано автором за даними [130].

Рис. 2.17 виявляє розрив між потенціалом цифрових технологій та їх фактичним використанням для ресурсної ощадності у будівництві. Управлінський висновок полягає у необхідності оцінювати не загальний рівень цифровізації, а функціонально визначені ознаки: автоматизований збір екологічних даних, інтеграцію BIM і ERP, простежуваність матеріалів, контроль енергоспоживання, облік відходів і верифікацію джерел.

Міждержавне позиціонування не утворює лінійної ієрархії: країни з високою екоінноваційною спроможністю можуть мати нижчі частки операційного використання цифрових рішень для екологічних цілей, тоді як держави з помірним інтегральним індексом демонструють сильні матеріальні практики [122; 129]. Багатовимірність підтверджує потребу у профільному, а не одномірному оцінюванні культури. Позиціонування країн наведено на рис. 2.18.

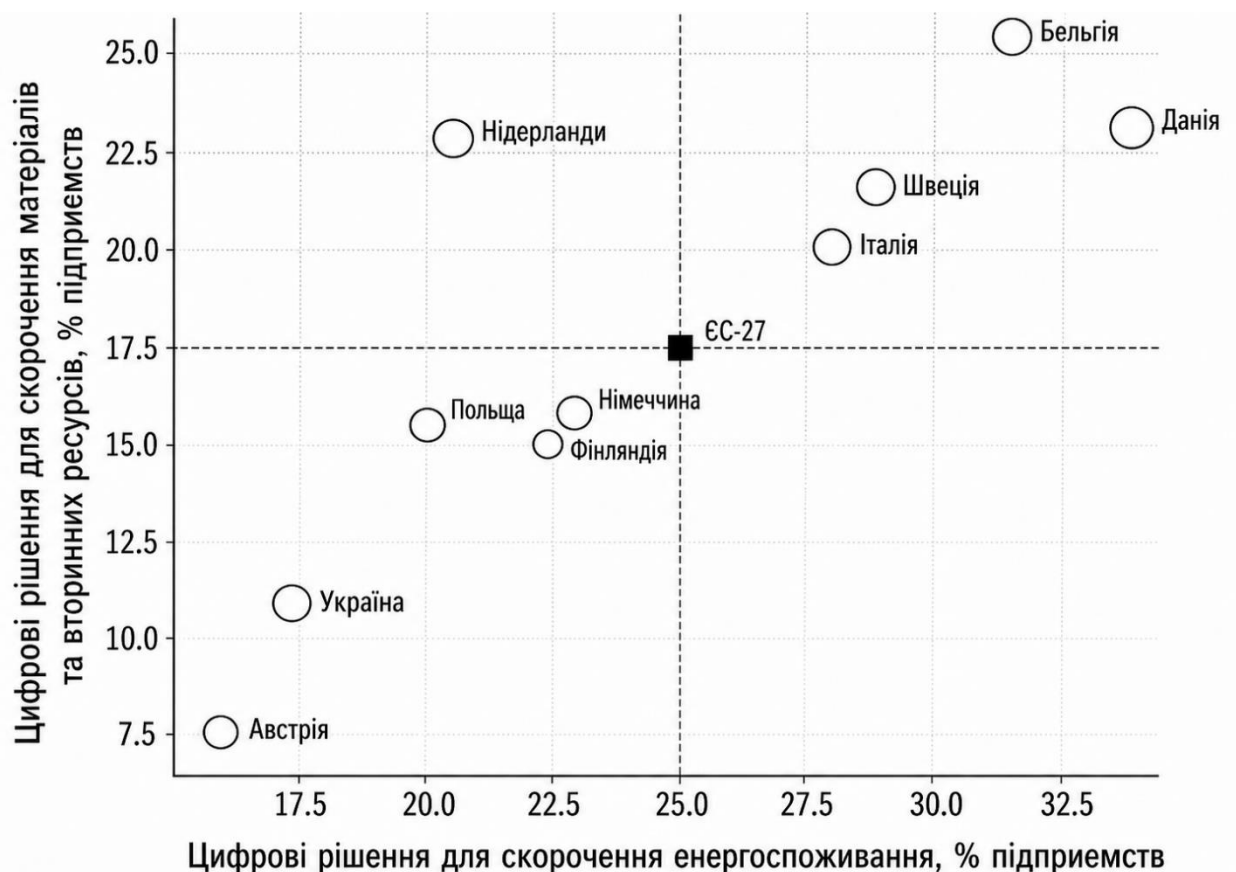


Рис. 2.18. Позиціонування країн за цифрово-екологічними практиками підприємств у 2025 році

Джерело: побудовано автором за даними [129].

Рис. 2.18 дозволяє розрізнити енергетичну та матеріальну спрямованість цифрових практик. Для підприємств-стейкхолдерів подібне розмежування має бути перенесене на рівень проєкту: цифровий інструмент оцінюється за конкретною екологічною функцією, а не за фактом його використання.

З метою виявлення відмінностей у механізмах закріплення екологічних цінностей, цифрових норм, інноваційної поведінки та стейкхолдерської відповідальності в управлінських практиках підприємств проведено аналіз європейських, азійських та американських моделей культурної інституціоналізації здійснюється. Порівняння регіональних моделей дає змогу визначити універсальні й контекстно залежні інструменти трансформації корпоративних цінностей у формалізовані правила, компетентності, процедури прийняття рішень і критерії оцінювання результатів. Одержані узагальнення формують методологічне підґрунтя для обґрунтування моделі інноваційно-екологічної корпоративної культури підприємств-стейкхолдерів проєктів біосферосумісного будівництва та визначення можливостей адаптації міжнародних практик до інституційних умов України. Європейська модель формується через нормативну інтеграцію, прозорість, звітність і управління життєвим циклом. Перехідний шлях будівельної екосистеми ЄС поєднує зелений і цифровий переходи [26], рамка Level(s) створює спільну мову життєвоциклового оцінювання [15], а вимоги корпоративної звітності, належної перевірки та ESRS переносять відповідальність на ланцюги створення вартості [59; 112; 113]. Переглянута Директива про енергетичну ефективність будівель запроваджує поетапне розкриття потенціалу глобального потепління протягом життєвого циклу нових будівель [133]. Культурною нормою стає не декларація екологічності, а простежуване обґрунтування проєктних рішень.

Азійські моделі вирізняються державною координацією, технологічною дисципліною, масовим навчанням і швидким масштабуванням стандартів. Singapore Green Building Masterplan поєднує регуляторні вимоги, фінансові стимули та орієнтири «80–80–80», а Green Mark 2021 охоплює енергетичну

результативність, втілений вуглець, ремонтпридатність, кліматичну резильєнтність, здоров'я користувачів і розумні технології [115; 116]. Японська CASBEE формує професійну платформу оцінювання екологічної якості й навантаження будівель [117], тоді як китайські програми забезпечують масштабування енергозбереження, модернізації та зелених матеріалів через державні плани [118].

Американська модель спирається на ринкову сертифікацію, партнерські програми, корпоративне лідерство й конкуренцію за репутацію. LEED v5 концентрується на декарбонізації, якості життя, резильєнтності та екологічному відновленні [119], а Better Buildings формує мережі практиків і демонструє економічні вигоди від добровільних зобов'язань [120]. Перевагою моделі є підприємницька швидкість поширення рішень; обмеженням – ризик розриву між маркетинговими заявами та підтвердженням ефектом.

Регіональні моделі порівняно за домінантною логікою, роллю держави, культурним акцентом і ризиком обмеженості у табл. 2.11. Доведено неможливість механічного перенесення окремої регіональної моделі. Європейська нормативна прозорість формує доказовість, азійська організаційна дисципліна забезпечує масштабування, американська ринкова мотивація підтримує інноваційну активність. Для України доцільним є структурне поєднання їх переваг із запобіганням формальному комплаєнсу, адміністративному виконанню без внутрішнього прийняття та іміджевій екологічності.

Регіональне групування не повністю розкриває механізм перетворення екологічної цілі на корпоративну норму, оскільки в межах однієї країни одночасно діють регуляторні, стандартизаційні, циркулярні, цифрові та життєвоциклові інструменти. Для методологічної систематизації запропоновано п'ять функціональних моделей: регуляторно-таксономічну, стандартизаційно-верифікаційну, циркулярно-екосистемну, екоінноваційно-цифрову та проєктно-життєвоциклову.

Порівняльна характеристика європейського, азійського та американського підходів до інтеграції інноваційно-екологічної корпоративної культури

Ознака	Європейський підхід	Азійський підхід	Американський підхід
Домінуюча логіка впливу	Нормативна інтеграція, прозорість, звітування, управління життєвим циклом	Державна координація, технологічна дисципліна, стандартизоване масштабування	Ринкові стимули, добровільна сертифікація, корпоративне лідерство
Роль держави	Формує рамки переходу, звітності, стандартів і відповідальності перевірки	Визначає стратегічні цілі, програми, вимоги до енергоефективності та матеріалів	Створює програми підтримки, але значну роль відіграє ринок
Роль підприємства	Забезпечує доказовість, простежуваність даних і відповідність вимогам	Виконує стандарти, розвиває технологічні компетентності та дисципліну процесів	Конкурує через сертифікацію, інноваційні рішення та репутацію
Культурний акцент	Відповідальність, прозорість, залучення заінтересованих сторін	Колективна дисципліна, якість, навчання, виконання встановлених норм	Підприємницькість, результативність, добровільні зобов'язання
Ризик обмеженості	Надмірна формалізація і звітність без поведінкової зміни	Формальне виконання стандартів без внутрішнього прийняття цінностей	Переважання іміджевих заяв над підтвердженням екологічним ефектом
Значення для України	Корисна для гармонізації з європейськими правилами та звітністю	Корисна для швидкого масштабування стандартів і дисципліни виконання	Корисна для розвитку добровільної сертифікації, ринкової мотивації та лідерства

Джерело: сформовано автором на основі [15; 26; 59; 112–120; 133].

Моделі відображають не послідовні історичні етапи, а глибину інституціоналізації. Регуляторна модель задає мінімально допустиму поведінку; верифікаційна формує процедури і довіру до даних; циркулярна поширює відповідальність на міжорганізаційні потоки; екоінноваційно-цифрова забезпечує оперативне управління ресурсами; життєвоциклова інтегрує складові у рішення щодо конкретного активу.

Логіку поглиблення інституціоналізації подано на рис. 2.19.



Рис. 2.19. Типологія міжнародних моделей інноваційно-екологічної корпоративної культури підприємств-стейкхолдерів

Джерело: розроблено автором.

Рис. 2.19 відображає поступовий перехід від дотримання мінімальних екологічних вимог до проектно-екосистемної трансформації, за якої екологічні цілі інтегруються у параметри проектування, контрактування, цифрового контролю та розподілу створюваної цінності. Така еволюція означає зміну самої логіки управління: екологічні характеристики перестають бути зовнішніми обмеженнями проєкту й перетворюються на критерії вибору технологій, матеріалів, партнерів та способів організації міжстейкхолдерської взаємодії. Поглиблення не скасовує попередні моделі: життєвоциклова практика спирається на регуляторні межі, стандарти, партнерські ринки ресурсів і цифрові дані. Тому кожна наступна модель доцільно розглядати не як альтернативу попередній, а як вищий рівень її функціональної інтеграції, що включає раніше сформовані інструменти та доповнює їх новими механізмами координації. Для підприємств-стейкхолдерів проєктів біосферосумісного будівництва це формує передумови переходу від фрагментарного виконання екологічних вимог до узгодженого управління економічними, цифровими, ресурсними та екологічними параметрами проєкту. Водночас результативність такого переходу залежить від інституційної сумісності застосовуваних інструментів, доступності стандартизованих даних та здатності учасників проєктної екосистеми координувати рішення протягом усього життєвого циклу об'єкта. Зміст,

інституційні приклади та обмеження функціональних моделей узагальнено у табл. 2.12.

Таблиця 2.12

Порівняльна характеристика міжнародних моделей інноваційно-екологічної корпоративної культури

Модель	Домінантний механізм	Корпоративна норма	Інституційні приклади	Обмеження
Регуляторно-таксономічна	Обов'язкові норми, таксономія, звітність, публічні закупівлі	Дотримання порогових значень і документування відповідності	ЄС: EPBD, вимоги до енергоефективності та життєвоциклового GWP	Ризик формального комплаєнсу без зміни внутрішніх рішень
Стандартизаційно-верифікаційна	Добровільні або контрактно обов'язкові стандарти, аудит	Процедурна дисципліна, постійне поліпшення, зовнішня довіра	ISO 14001, EMAS, перевірені екологічні декларації	Нерівномірна глибина застосування; сертифікат може не охоплювати проєктний ланцюг
Циркулярно-екосистемна	Партнерські угоди, вторинні ринки, циркулярні закупівлі	Спільна відповідальність за матеріальні потоки і залишкову цінність	до 2050 р. повністю циркулярна економіка, окрема перехідна програма для будівництва	Високі вимоги до координації, якості вторинних матеріалів і логістики
Екоінноваційно-цифрова	Підтримка інновацій, цифрові платформи, дані реального часу	Екологічна результативність як параметр операційного управління	Країни-лідери екоінновацій; цифрові рішення для енергії та матеріалів	Розрив між великими та малими підприємствами; технологія без управлінської інтеграції
Проєктно-життєвоциклова	Єдині методики оцінювання об'єкта, сертифікація, стимули	Порівняння альтернатив за повним життєвим циклом	Level(s), життєвоцикловий GWP за EPBD; Singapore Green Mark 2021	Висока інформаційна складність і залежність від якості вихідних даних

Джерело: розроблено автором.

Стратегічні та процедурні механізми визначають обов'язковість норм, організаційний дизайн і навчання створюють спроможність їх виконувати, мотивація підтримує повторюваність поведінки, цифрова прозорість

забезпечує перевірюваність, а стейкхолдерська взаємодія поширює норми на проєктну мережу.

Для діагностики сформованості культури потрібне поєднання поведінкових, процедурних, цифрових і результативних індикаторів, наведене у табл. 2.13.

Таблиця 2.13

Система показників оцінювання сформованості інноваційно-екологічної корпоративної культури підприємства-стейкхолдера

Вимір оцінювання	Зміст виміру	Можливі показники	Джерела даних
Ціннісний	Рівень прийняття інноваційних та екологічних орієнтирів	Частка працівників, які підтримують екологічні цілі; оцінка готовності до змін; рівень довіри до керівництва	Опитування, інтерв'ю, внутрішні комунікації
Управлінсько-процедурний	Закріплення культури у правилах, політиках і проєктних процедурах	Наявність екологічних критеріїв у закупівлях; регламенти добору матеріалів; правила роботи з відходами	Стратегії, політики, регламенти, контракти
Компетентнісний	Здатність персоналу застосовувати нові підходи	Кількість годин навчання; частка працівників з цифровими та екологічними компетентностями; результати атестацій	Кадрові дані, освітні програми, оцінювання персоналу
Цифрово-аналітичний	Використання даних для контролю інноваційних і екологічних рішень	Частка проєктів із цифровими моделями; доступність даних щодо ресурсів; кількість цифрових звітів	Спільні середовища даних, цифрові журнали, аналітичні панелі
Екосистемний	Поширення культурних норм на зовнішніх учасників проєктів	Частка підрядників, що відповідають екологічним вимогам; кількість консультацій із громадами; прозорість постачання	Контракти, звіти підрядників, протоколи взаємодії, громадські консультації
Результативний	Фактичні наслідки культурної інтеграції	Скорочення відходів; зменшення енергоспоживання; зниження кількості помилок; зростання повторного використання матеріалів	Проєктна звітність, фінансові дані, технічний контроль

Джерело: удосконалено автором.

Таблиця 2.13 запобігає двом методичним крайностям: зведенню культури до суб'єктивного опитування та ототожненню екологічної відповідальності з технічними показниками об'єкта. Поєднання сприйняття цінностей, наявності процедур, компетентностей, цифрових доказів, стейкхолдерської взаємодії й фактичних наслідків дозволяє оцінити культуру як управлінську здатність.

Українська будівельна галузь одночасно вирішує завдання масштабного відновлення, гармонізації з вимогами ЄС, підвищення прозорості та розвитку цифрової спроможності. Дефіцит капіталу, нерівномірна зрілість даних, значна частка малих підприємств і кадрові обмеження не дозволяють механічно перенести міжнародні моделі у повному обсязі. Адаптація має бути диференційованою за масштабом проєкту, функцією підприємства й рівнем екологічного ризику.

Європейський досвід доцільно використати для формування нормативної сумісності, життєвоциклової доказовості та прозорості даних; азійський – для дисципліни виконання стандартів, масового навчання та державної координації; американський – для розвитку добровільного лідерства, партнерських програм і ринкової мотивації. Національні стандарти зеленого будівництва створюють початкову інституційну основу, але їх результативність залежить від культурного закріплення у підприємствах і проєктних командах [121]. Напрями вибіркової адаптації регіонального досвіду подано у табл. 2.14. Аналіз обґрунтовує комбіновану модель, у якій нормативна сумісність не протиставляється ринковим стимулам, а організаційна дисципліна доповнюється цифровою доказовістю. Очікуваним результатом є культура, здатна одночасно забезпечувати швидкість відновлення, прозорість використання ресурсів, екологічну якість та прийнятність рішень для громад.

Для переведення комбінованої моделі у керований механізм запропоновано модульну архітектуру адаптації. Вона поєднує інституційний, корпоративний, стейкхолдерський, цифрово-інформаційний,

життєвоцикловий і результативний модулі. Модульність дозволяє встановити мінімально необхідний рівень процедур для різних типів підприємств, зберігаючи єдину логіку проєктної взаємодії.

Таблиця 2.14

Напрями адаптації європейського, азійського та американського досвіду для українських підприємств-стейкхолдерів

Підхід	Що доцільно адаптувати	Умови впровадження в Україні	Очікуваний управлінський ефект
Європейський підхід	Прозорість, звітування, управління життєвим циклом, відповідальна перевірка постачальників	Гармонізація стандартів, підготовка даних, розвиток внутрішніх процедур звітності	Підвищення довіри інвесторів, доступ до міжнародних проєктів, зменшення репутаційних ризиків
Азійський підхід	Державна координація, дисципліна стандартів, масове навчання, технологічна модернізація	Єдині галузеві вимоги, підтримка навчальних програм, координація відбудови	Швидше масштабування екологічних та інноваційних практик
Американський підхід	Добровільна сертифікація, ринкова мотивація, партнерські програми, корпоративне лідерство	Розвиток попиту на якісні зелені об'єкти, участь бізнес-асоціацій, публічне визнання результатів	Підвищення конкурентоспроможності та інноваційної активності
Комбінована модель	Поєднання нормативної сумісності, цифрової доказовості, проєктної дисципліни та ринкових стимулів	Інтеграція в корпоративне управління, контракти, навчання, мотивацію і цифрові дані	Формування культури біосферосумісного будівництва як стійкої управлінської здатності

Джерело: сформовано автором.

Інституційний модуль забезпечує сумісність із європейськими вимогами та диференціацію процедур. Корпоративний модуль пов'язує екологічні цілі зі стратегією, бюджетуванням, мотивацією й контролем. Стейкхолдерський модуль поширює вимоги на контракти та добір партнерів. Цифрово-інформаційний модуль формує спільне середовище даних і мінімальний набір

машинозчитуваних екологічних атрибутів. Життєвоцикловий модуль поєднує LCA та LCC, а результативний – замикає контур через профіль показників і коригувальні дії. Взаємозв'язок адаптаційних модулів відображено на рис. 2.20.

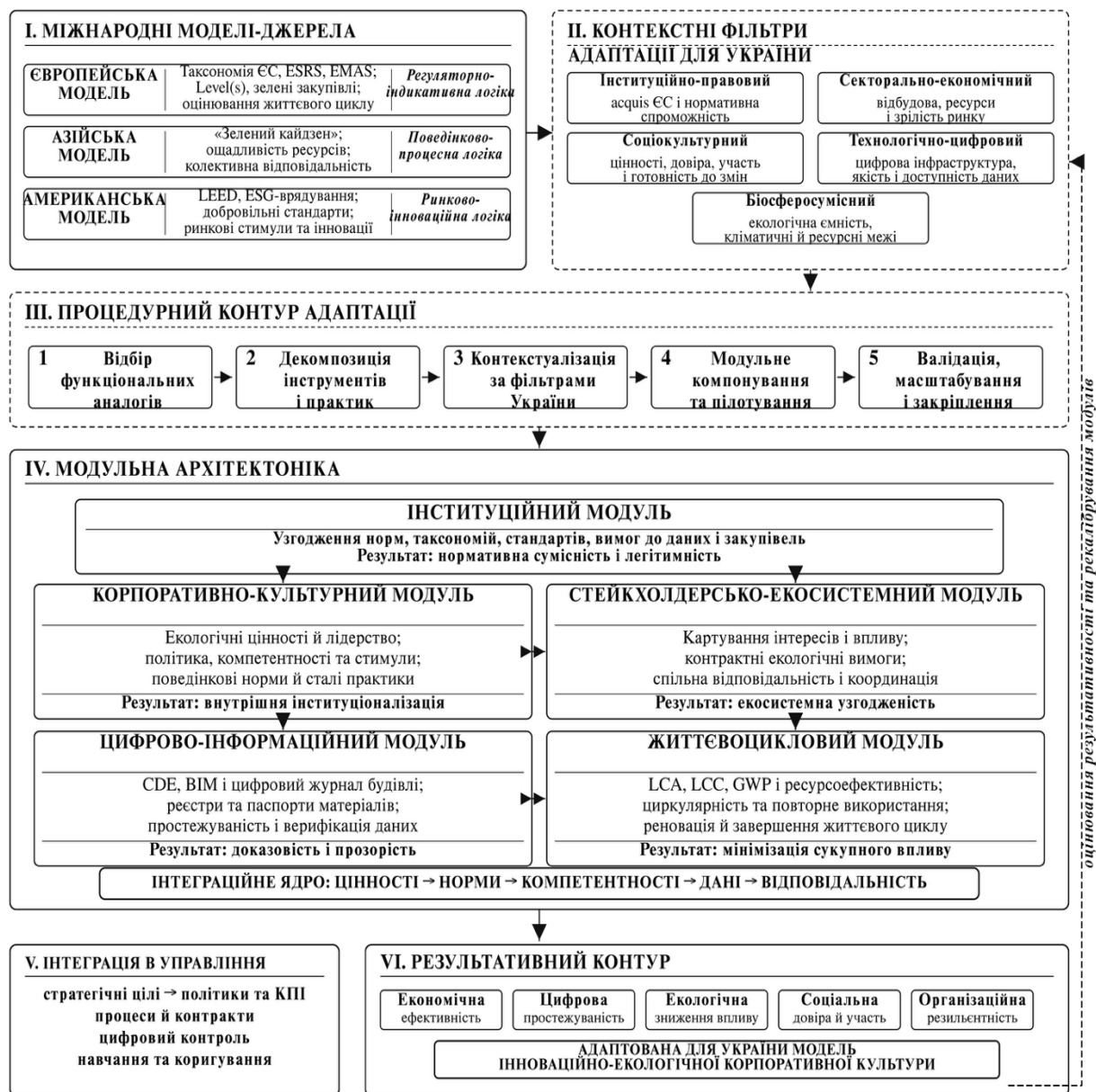


Рис. 2.20. Модульна архітектоніка адаптації міжнародних моделей інноваційно-екологічної корпоративної культури до української проєктної екосистеми

Джерело: розроблено автором.

Рис. 2.20 показує, що адаптація не завершується прийняттям нормативного документа. Інституційна вимога має пройти через корпоративні

правила, контрактну взаємодію, цифрові дані та життєвоциклове оцінювання, після чого результат порівнюється з цілями й повертається у цикл коригування. Така архітектура запобігає фрагментарному впровадженню окремих міжнародних практик.

Зміст модулів, інструментарій та пріоритети реалізації конкретизовано у табл. 2.15.

Таблиця 2.15

Модульна конфігурація адаптації міжнародних моделей до української проєктної екосистеми

Модуль	Зміст адаптації	Управлінський інструментарій	Пріоритет реалізації
Інституційний	Гармонізація з ЕРБД, таксономічними та життєвоцикловими вимогами ЄС	Єдині визначення, порогові критерії, формат подання даних	Поступове введення вимог за масштабом і типом проєкту
Корпоративний	Інтеграція екологічних цілей у стратегію, бюджетування, мотивацію і контроль	Політика, відповідальні особи, компетентності, внутрішній аудит	Спрощені системи для малих підприємств із ризик-орієнтованим обсягом процедур
Стейкхолдерський	Поширення вимог на постачальників і підрядників через контрактні механізми	Матриця відповідальності, екологічні KPI, умови приймання даних	Використання функціонального профілю IDEM під час добору учасників
Цифрово-інформаційний	Формування єдиного проєктного середовища даних	ВІМ, реєстри матеріалів, цифрові журнали, інтеграція з DREAM та ЄДЕССБ	Мінімальний набір машинозчитуваних екологічних атрибутів
Життєвоцикловий	Перехід від оцінювання експлуатаційної енергії до повного впливу об'єкта	LCA, LCC, GWP, проєктування для розбирання, вторинні матеріали	Пілотне застосування для великих публічних і відновлювальних проєктів
Результативний	Зв'язок культури з вимірюваними економічними, цифровими й екологічними наслідками	Система індикаторів Out1–Out5, верифікація та коригувальні дії	Відмова від формального рейтингу на користь профілю обмежень і адресних дій

Джерело: розроблено автором.

Таблиця 2.15 визначає послідовність практичної інституціоналізації культури: від гармонізації визначень і порогів до контрактних КРІ, цифрової простежуваності, пілотного життєвоциклового оцінювання та адресних управлінських дій. Диференціація за масштабом і ризиком дозволяє уникнути однакового адміністративного навантаження на великі компанії та малих виконавців.

Проведене дослідження довело, що інноваційно-екологічна корпоративна культура підприємства-стейкхолдера не зводиться до внутрішніх цінностей персоналу або сертифікованої системи менеджменту. Її предмет охоплює міжорганізаційний контур проекту, у якому екологічні цілі мають бути сумісними з контрактами, даними, компетентностями, ролями й відповідальністю інших учасників.

Міжнародний аналіз виявив п'ять функціональних моделей інституціоналізації культури. Регуляторно-таксономічна модель задає обов'язкові межі; стандартизаційно-верифікаційна забезпечує процедурну стабільність; циркулярно-екосистемна формує спільну відповідальність за матеріальні потоки; екоінноваційно-цифрова переводить екологічні показники в операційне управління; проєктно-життєвоциклова інтегрує економічні та екологічні наслідки в рішення щодо конкретного активу [162].

Кількісні результати підтвердили некомпенсаційний характер культури. Висока екоінноваційна позиція може поєднуватися з низькою циркулярністю, поширена сертифікація – з недостатньою цифровою інтеграцією, а високий рівень перероблення – з низькоякісним використанням матеріалів. Тому оцінювання має спиратися на профіль взаємопов'язаних ознак, а не на один інтегральний показник зовнішнього середовища.

Науковий результат підрозділу полягає в удосконаленні структурно-адаптаційної моделі інноваційно-екологічної корпоративної культури підприємства-стейкхолдера через узгодження ціннісного, управлінсько-процедурного та поведінкового рівнів, поєднання європейської нормативної прозорості, азійської організаційної дисципліни й американської ринкової

мотивації та їх адаптацію до інституційних і ресурсних умов біосферосумісного відновлення України. Відмінність моделі полягає у перенесенні предмета культури з внутрішнього середовища підприємства на міжорганізаційний контур проєктної екосистеми, де цінності операціоналізуються через власників даних, контрактні вимоги, цифрову доказовість і життєвоциклові показники.

2.3. Індикативно-критеріальна система та методичний інструментарій оцінювання економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва

Методологічна завершеність економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами визначається не кількістю впроваджених цифрових засобів, а здатністю встановити причинно-наслідковий зв'язок між управлінською дією, зміною параметрів проєктної екосистеми та отриманим результатом. У підрозділах 2.1 і 2.2 стійкість та резильєнтність підприємств-стейкхолдерів розкрито як властивості їх функціонування у взаємозалежній проєктній екосистемі, а інноваційно-екологічну корпоративну культуру – як поведінковий і ціннісний механізм прийняття рішень. Наступним методологічним завданням є операціоналізація цих положень: визначення того, які характеристики управління підлягають вимірюванню, якими даними вони підтверджуються, як різномірні показники приводяться до порівнянного вигляду та яким чином результати оцінювання трансформуються у параметри економіко-цифрових моделей.

Потреба в такій операціоналізації посилюється специфікою біосферосумісного будівництва. Рішення щодо матеріалів, конструкцій, джерел енергії, логістики, цифрової координації та організації експлуатації мають різний часовий горизонт і належать до різних центрів відповідальності. Короткострокова економія на стадії будівництва може збільшувати витрати

життєвого циклу, вуглецеве навантаження або обсяг майбутніх відходів; високий рівень автоматизації не гарантує якості управління, якщо дані неповні, неузгоджені або не мають визначеного власника. За таких умов одновимірне оцінювання через прибутковість, окупність цифрових інвестицій чи формальну відповідність сертифікаційним вимогам не відображає фактичної спроможності підприємства діяти у біосферосумісній проєктній екосистемі.

Масштаб проблеми підтверджується актуальними міжнародними даними. За оцінками Програми ООН з довкілля та GlobalABC, сектор будівель і будівництва формує близько 37 % глобальних викидів CO₂ і майже половину світового вилучення матеріальних ресурсів [52]. Отже, управлінська ефективність у цій сфері має фіксувати не лише фінансовий результат, а й ресурсні, вуглецеві, експлуатаційні та просторові наслідки. Європейська рамка Level(s) закріплює спільну мову показників життєвого циклу, а оновлена Директива (ЄС) 2024/1275 переводить life-cycle GWP нових будівель у площину регуляторного вимірювання та розкриття [15; 133]. Делегований регламент (ЄС) 2026/52 деталізує єдину рамку національних розрахунків і прив'язує її до EN 15978, що додатково підсилює вимогу порівнюваності та доказовості результатів [137; 142].

У межах цього дослідження під індикативно-критеріальною системою оцінювання економіко-цифрового управління пропонується розуміти ієрархічно впорядковану сукупність цільових результатів, критеріїв, індикаторів, правил їх вимірювання, джерел і рівнів доказовості даних, процедур нормування та порогових обмежень, що забезпечує перехід від різномірної інформації про підприємство і проєкт до порівнянного профілю його управлінської спроможності. На відміну від набору KPI, така система встановлює не лише те, що вимірюється, а й логіку зв'язку між показником, управлінською функцією, відповідальним суб'єктом та рішенням, для прийняття якого використовується результат.

Інструментарій оцінювання цифрових і біосферосумісних моделей управління сформувався на перетині кількох дослідницьких традицій. Економічний напрям зосереджується на вартості, строках, продуктивності, надійності планування та вартості життєвого циклу. Екологічний напрям спирається на оцінювання життєвого циклу, вуглецевого сліду, ресурсної ефективності й циркулярності. Багатокритеріальний напрям надає процедури зважування та зіставлення альтернатив. Цифрово-інформаційний напрям переносить акцент на структуру, якість, інтеперабельність і простежуваність даних. Інституційний напрям пов'язує показники з обов'язковими порогами, фінансуванням, закупівлями та незалежною верифікацією. Методи LCA, формалізовані в ISO 14040 та ISO 14044, задають послідовність визначення цілей і меж, інвентаризації потоків, оцінювання впливів та інтерпретації результатів [140; 141]. Для будівель цей принцип конкретизовано EN 15978, де екологічні наслідки структуруються за стадіями життєвого циклу [142]. Водночас LCA не вирішує питання економічної доцільності, соціальної прийнятності, цифрової зрілості та організаційної адаптивності підприємства. З цієї причини застосування життєвоциклових показників у межах економіко-цифрового управління потребує їх включення до ширшої критеріальної конструкції.

Багатокритеріальні методи дозволяють працювати з показниками різної природи та вагомості. Метод аналізу ієрархій Т. Сааті формалізує експертні парні порівняння і придатний для обґрунтування ваг, тоді як загальна теорія MCDA наголошує на залежності результату від структури критеріїв, правил компенсації та способу інтерпретації переваг [144; 145]. Для проєктів біосферосумісного будівництва це має принципове значення: високий фінансовий або цифровий результат не повинен автоматично компенсувати невиконання вимог безпеки, істотне перевищення вуглецевого ліміту чи недостовірність даних.

Окремий методологічний пласт становить інформаційне управління. ISO 19650-1 визначає принципи організації та цифровізації інформації про

будівлі й цивільні інженерні роботи із застосуванням BIM [10]. Відповідно цифрова зрілість у запропонованій системі вимірюється не кількістю застосованих платформ, а ступенем керованості інформаційного циклу та його спроможністю підтримувати економічні, екологічні й стейкхолдерські рішення (табл. 2.16).

Таблиця 2.16

Систематизація методологічних підходів до оцінювання економіко-цифрового управління у біосферосумісному будівництві

Методологічний напрям	Предмет оцінювання	Аналітичний внесок	Обмеження автономного застосування	Функція у запропонованій системі
Фінансово-економічний та життєвоцикловий аналіз	Вартість, дохідність, строки, ресурси, LCC	Дає грошову оцінку рішень і часових наслідків	Не охоплює повністю біосферні, цифрові та соціальні результати	Формування Out1 і перевірка економічної життєздатності
LCA та вуглецеве оцінювання	Викиди, енергія, матеріальні потоки, відходи за життєвим циклом	Запобігає перенесенню екологічного навантаження між стадіями	Залежить від меж системи, сценаріїв та якості EPD	Формування ядра Out3 і некомпенсаційних екологічних порогів
Багатокритеріальне оцінювання	Різномірні критерії, ваги, альтернативи, переваги	Створює формальну основу нормування, зважування і порівняння	Результат чутливий до ваг та припущень про компенсацію	Підготовка часткових індексів і сценарне порівняння
Інформаційне управління BIM/CDE	Повнота, актуальність, узгодженість, інтероперабельність і версійність даних	Пов'язує управлінські рішення з контрольованим інформаційним середовищем	Факт використання BIM не доводить якості даних або економічного ефекту	Операціоналізація Out2 та коефіцієнта доказовості
Стейкхолдерське та людиноцентричне оцінювання	Безпека, залучення, прозорість, доступність, якість взаємодії	Враховує розподіл ефектів між учасниками, користувачами і громадами	Частина показників має експертну природу та потребує регламентованих шкал	Формування Out4 і перевірка соціальної легітимності
Резильєнтно-інноваційне оцінювання	Адаптивність, безперервність, навчання, інноваційна здатність, готовність до збурень	Виявляє спроможність зберігати керованість за зміни умов	Потребує сценарних даних і не зводиться до ретроспективних KPI	Формування Out5 та параметрів стрес-тестування

Джерело: систематизовано автором за [140–145].

Синтез наведених підходів дає підстави відмовитися від паралельного існування шести автономних вимірів, запропонованих у первинній версії методики, та підпорядкувати систему п'ятьом результуючим компонентам, які надалі використовуються як виходи економіко-цифрової моделі. Резильєнтність, своєю чергою, включається до організаційно-інноваційної стійкості як здатність до передбачення, адаптації, відновлення керованості та організаційного навчання.

Відповідно базовими результуючими компонентами визначено: Out1 – економічну результативність; Out2 – цифрову зрілість; Out3 – екологічну та біосферосумісну ефективність; Out4 – стейкхолдерно-людиноцентричну орієнтованість; Out5 – організаційно-інноваційну стійкість. Їх зміст не дублює окремі показники, а задає п'ять функціонально відмінних зон управлінської спроможності підприємства-стейкхолдера [259,275]. Критерії деталізують бажаний стан у межах кожного виходу, індикатори фіксують ступінь його досягнення, а правила доказовості визначають, наскільки отримане значення може бути використане для управлінського висновку.

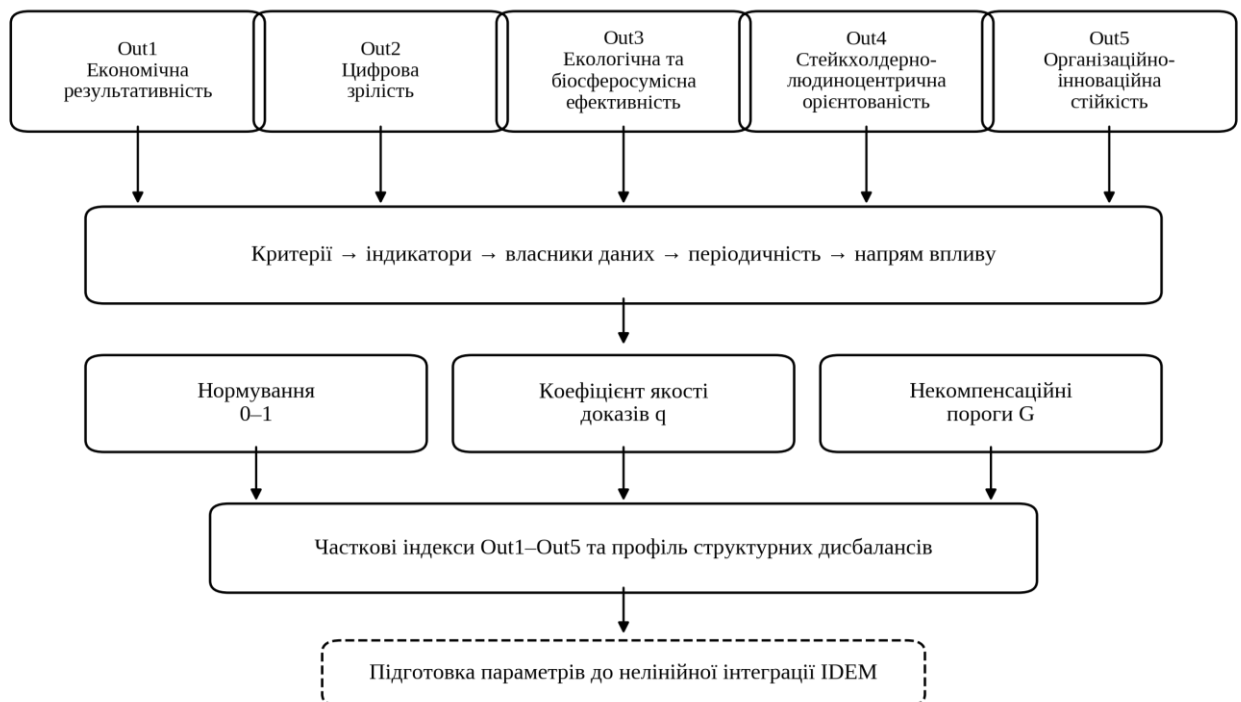


Рис. 2.21. Методологічна архітектура індикативно-критеріальної системи оцінювання економіко-цифрового управління

Джерело: розроблено автором.

Запропонована архітектура відрізняється від традиційного інтегрального індексування двома положеннями. По-перше, нормована величина індикатора коригується з урахуванням якості доказової бази, тому неперевірена декларація не є еквівалентною фактичним даним автоматизованого обліку або незалежно верифікованому розрахунку. По-друге, до агрегування вводяться некомпенсаційні пороги, які блокують позитивний висновок за критичного невиконання нормативної, безпекової, екологічної чи інформаційної вимоги. Саме поєднання порівнюваності, доказовості та пороговості формує методологічну основу для подальшого нелінійного агрегування Out1–Out5.

Порівняння міжнародних моделей свідчить, що методична зрілість оцінювання визначається не наявністю окремої рейтингової системи, а послідовністю інституційних зв'язків між нормою, методикою розрахунку, джерелом даних, процедурою перевірки, економічним стимулом і фактичним моніторингом. Саме ця послідовність переводить екологічні та цифрові характеристики з площини добровільного декларування у контур управлінської відповідальності. Відсутність будь-якої ланки знижує дієвість системи: без порогів показник не впливає на рішення; без стандартизованих даних поріг не підлягає порівнянню; без фінансових або контрактних наслідків результати залишаються інформаційними; без експлуатаційної перевірки не встановлюється розрив між проєктною та фактичною результативністю.

Європейська модель найбільш послідовно поєднує життєвоциклове оцінювання з регуляторним і фінансовим контуром. Level(s) формує спільну систему показників для вуглецю, ресурсів, води, здоров'я, адаптації та вартості життєвого циклу [15]. Директива (ЄС) 2024/1275 встановлює, що life-cycle GWP має розраховуватися і розкриватися в енергетичному сертифікаті для нових будівель площею понад 1000 м² з 2028 р., а з 2030 р. – для всіх нових будівель; держави-члени мають також формувати траєкторії граничних значень [133]. Делегований регламент (ЄС) 2026/52 забезпечує гармонізовану

рамку національних розрахунків, 50-річний референтний період і структуру розкриття за стадіями життєвого циклу [137].

Регламент (ЄС) 2024/3110 щодо будівельної продукції додає до цієї конструкції цифровий продуктовий паспорт, вимогу точності, повноти й актуальності інформації та інтегрованості із BIM [138]. Таксономія ЄС переводить екологічні характеристики діяльності у фінансову класифікацію через критерії істотного внеску, принцип недопущення значної шкоди та мінімальні гарантії [16,274]. У результаті один і той самий масив даних про енергію, матеріали, викиди, воду та вплив на екосистеми поступово набуває одночасно проєктної, регуляторної, інвестиційної та звітної функцій.

Ринкові системи сертифікації демонструють іншу, але методично сумісну логіку. BREEAM New Construction v7 посилює вимоги до вуглецю життєвого циклу, біорізноманіття, резильєнтності та вибору матеріалів, а незалежна перевірка створює зовнішній контур доказовості [146]. LEED v5 структурує критерії навколо декарбонізації, якості життя та збереження і відновлення екосистем, одночасно розширюючи вимоги до моніторингу результатів протягом життєвого циклу [147]. Методичне значення цих систем полягає не в копіюванні бальної шкали, а у використанні чітких категорій результату, документованих доказів і процедур третьої сторони.

Канадський Zero Carbon Building – Design Standard v4 поглиблює вуглецевий контур через поєднання операційних і втілених викидів, холодоагентів, енергоефективності та плану переходу [148]. Сінгапурський Green Mark 2021 поряд з енергетичною ефективністю охоплює вуглець життєвого циклу, придатність до обслуговування, інтелектуальність, резильєнтність та здоров'я користувачів [116]. CORENET X має окреме значення для цифрового управління: регуляторний процес перебудовано навколо узгодженої BIM-моделі, відкритого формату IFC+SG і автоматизованої перевірки моделей; це скорочує множинність відомчих подань та переносить виявлення конфліктів на ранні стадії [150].

Австралійська система NABERS доповнює проєктне оцінювання фактичним експлуатаційним бенчмаркінгом енергії, води, відходів та якості внутрішнього середовища. Рейтинг чинний дванадцять місяців, тому результат потребує регулярного підтвердження реальними даними [151]. Для методології економіко-цифрового управління цей принцип є особливо цінним: прогнозована ефективність і фактична ефективність мають розглядатися як різні стани одного показника, а їх розрив – як окремий діагностичний сигнал.

Результати проведення порівняльної характеристики міжнародних моделей оцінювання та цифрового забезпечення біосферосумісного будівництва здійснена на основі даних Додатку В (табл. В1 та В2) та наведена в табл. 2.17.

Таблиця 2.17

Порівняльна характеристика міжнародних моделей оцінювання та цифрового забезпечення біосферосумісного будівництва

Модель	Домінуючі критерії	Цифрове та доказове забезпечення	Механізм впливу на рішення	Методичний орієнтир для системи Out1–Out5
1	2	3	4	5
Європейський Союз: Level(s), EPBD, таксономія, CPR	Life-cycle GWP, енергія, ресурси, вода, здоров'я, адаптація, LCC	EPD, DPP, BIM-сумісні дані, енергетичний сертифікат	Нормативні пороги, фінансова класифікація, розкриття даних	Поєднання Out1, Out2 і Out3 з обов'язковими порогами та доказами
BREEAM New Construction v7	Вуглець життєвого циклу, ресурси, біорізноманіття, резильєнтність, здоров'я	Платформа оцінювання, документовані докази, третя сторона	Сертифікація і ринкова диференціація активу	Верифікація Out3–Out5 та недопущення формального цифрового ефекту
LEED v5	Декарбонізація, якість життя, екологічне збереження та відновлення	Єдині вимоги до даних від проєктування до експлуатації	Рейтинг, мінімальні вимоги, довгострокова стратегія результативності	Людиноцентричне поєднання Out3 і Out4 з моніторингом
Канада: ZCB Design v4	Операційний і втілений вуглець, енергія, холодоагенти, перехід до нульових викидів	Енергомодельовання, whole-building LCA, підтверджені розрахунки	Проектна сертифікація та план декарбонізації	Розмежування прогнозованого і досягнутого результату Out3

Продовження табл. 2.17

1	2	3	4	5
Сінгапур: Green Mark 2021, CORENET X	Енергія, whole-life carbon, здоров'я, резильєнтність, intelligence, maintainability	IFC+SG, BIM, Model Checker, автоматизовані правила	Регуляторні шлюзи та цифровий реінжиніринг погоджень	Поєднання Out2, Out4, Out5 з процедурою переходу між стадіями
Австралія: NABERS	Енергія, вода, відходи, внутрішнє середовище, фактична експлуатаційна ефективність	Реальні операційні дані, незалежна оцінка, щорічне поновлення	Бенчмаркінг і регулярна верифікація	Фактичний контроль Out3–Out4 та оцінка розриву «проект–експлуатація»

Джерело: систематизовано автором за [135–139; 146–151].

Наведене порівняння дозволяє сформулювати методологічний висновок: для біосферосумісного будівництва оцінювання має бути дворівневим. Перший рівень становить перевірка некомпенсаційних умов, невиконання яких унеможлиблює позитивну класифікацію незалежно від інших переваг. Другий рівень – порівняльне оцінювання досягнутої спроможності за Out1–Out5. Така конструкція усуває ваду класичних адитивних рейтингів, коли високі бали в одній категорії маскують критичний провал в іншій (рис. 2.22).



Рис. 2.22. Інституційна архітектура міжнародного інструментарію управління результативністю біосферосумісного будівництва

Джерело: розроблено автором.

Міжнародний досвід також показує, що цифрова інфраструктура має статус доказового середовища, а не самостійної цілі. Регуляторна цінність BIM, цифрового паспорта, CDE чи експлуатаційних платформ виникає тоді, коли вони зберігають походження даних, їх версійність, правила доступу та зв'язок із рішенням. Відповідно індикатор цифрової зрілості повинен включати не тільки автоматизацію, а й інтероперабельність, простежуваність, відповідальність за дані та здатність виконувати контрольні правила без ручного дублювання.

Запропоновано формування системи за принципом мінімально достатнього індикативного ядра. Його зміст полягає у відмові від надмірної кількості показників, що збільшує транзакційні витрати збору даних і створює формальну точність без підвищення якості рішення. До ядра включається лише показник, для якого одночасно визначені змістовний критерій, спосіб розрахунку, напрям впливу, джерело даних, періодичність оновлення, відповідальний суб'єкт і управлінська дія, що може бути ініційована за результатом його зміни.

Другим принципом є наскрізна життєвоциклова релевантність. Показник має бути прив'язаний до стадії, на якій формується рішення, та до стадії, на якій проявляється результат. Наприклад, вибір матеріалу здійснюється переважно під час проєктування і закупівель, але його наслідки відображаються у початковій вартості, втіленому вуглеці, експлуатаційному обслуговуванні та потенціалі повторного використання. Якщо часову рознесеність не зафіксувати, оцінювання буде систематично переоцінювати короткострокові вигоди.

Третім принципом є атрибутована відповідальність. Для кожного індикатора визначається власник первинних даних, суб'єкт розрахунку, суб'єкт верифікації та власник управлінського рішення. Ці ролі можуть належати різним стейкхолдерам. Такий поділ є методично доцільнішим за єдину графу «відповідальний», оскільки зменшує ризик ситуації, коли одна сторона одночасно генерує дані, оцінює їх якість і затверджує результат.

Четвертим принципом є некомпенсаційність критичних вимог. Законність, безпека, мінімальна енергетична ефективність, допустимий екологічний вплив, захищеність і мінімальна доказовість даних не повинні компенсуватися рентабельністю або високою цифровою оснащеністю. П'ятий принцип – доказова диференціація: однакове нормоване значення має різну аналітичну надійність залежно від походження даних. Шостий принцип – динамічність: оцінка формується не одноразово, а відтворюється за контрольними шлюзами і в експлуатації, що дозволяє аналізувати траєкторію, а не лише фінальний стан (табл. 2.18).

Таблиця 2.18

Методологічні принципи формування індикативно-критеріальної системи економіко-цифрового управління

Принцип	Зміст	Методичне правило	Ризик порушення
Мінімально достатнє ядро	Відбір лише показників, що впливають на управлінське рішення	Кожен індикатор має критерій, формулу, джерело, власника та дію	Перевантаження КРІ і формальна точність
Життєвоциклова релевантність	Урахування стадії формування рішення і стадії прояву ефекту	Індикатор маркується фазою життєвого циклу та горизонтом оцінювання	Переоцінка короткострокових вигід
Атрибутована відповідальність	Розмежування володіння даними, розрахунку, верифікації та рішення	Для кожного показника встановлюється чотири ролі або обґрунтовується їх поєднання	Невизначеність відповідальності та конфлікт інтересів
Некомпенсаційність критичних вимог	Критичний провал не нівелюється високими значеннями інших компонентів	До агрегування застосовується шлюзовий коефіцієнт G	Хибнопозитивна інтегральна оцінка
Доказова диференціація	Результат коригується за надійністю джерела	Застосовується коефіцієнт якості доказів q	Еквівалентність декларацій і верифікованих даних
Динамічна відтворюваність	Оцінка оновлюється у контрольних точках і в експлуатації	Зберігається історія значень, версій даних та управлінських рішень	Втрата причинності та неможливість оцінити ефект змін

Джерело: розроблено автором.

Побудова ієрархії починається з результату, а не з наявного масиву даних. Для кожного Out встановлюється сукупність критеріїв, що відображають зміст управлінської спроможності, після чого добираються

індикатори, здатні зафіксувати її зміну. Така послідовність усуває поширену методичну помилку, за якої до інтегральної оцінки включаються лише ті показники, що легко отримати з фінансової звітності або інформаційної системи, тоді як суттєві біосферні, стейкхолдерські чи адаптивні характеристики залишаються поза вимірюванням.

Out1 «Економічна результативність» відображає спроможність підприємства створювати і зберігати економічну цінність у межах проєкту та життєвого циклу активу. Його критерії охоплюють фінансову стійкість, продуктивність, вартісну та часову керованість, ефективність використання ресурсів і життєвоциклову цінність. Включення LCC (Life Cycle Costing) принципово змінює трактування економічного результату: мінімальна початкова ціна не розглядається як оптимум, якщо вона збільшує експлуатаційні витрати, ризик простоїв або витрати на модернізацію.

Out2 «Цифрова зрілість» характеризує не рівень технологічної насиченості, а спроможність цифрового середовища забезпечувати достовірне, своєчасне й інтероперабельне відтворення управлінської реальності. До його критеріїв належать якість і повнота даних, інтегрованість інформаційних потоків, автоматизація контрольних процедур, простежуваність змін, захищеність доступу та аналітична придатність інформації. Тому факт використання BIM (Building Information Modeling) або ERP (Enterprise Resource Planning) не має самостійної оціночної переваги без перевірки того, чи зменшує система інформаційну асиметрію, дублювання і час циклу рішення.

Out3 «Екологічна та біосферосумісна ефективність» виходить за межі традиційної ресурсоефективності. Поряд з GWP (Global Warming Potential), енергією, водою, відходами і циркулярністю він включає просторову сумісність з природними системами, водоутримання, проникність поверхонь, збереження і відновлення зелених зв'язків. Таке розширення необхідне, оскільки низьковуглецева будівля не є автоматично біосферосумісною, якщо

її розміщення або просторове рішення погіршує екосистемні функції території.

Out4 «Стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість» відображає якість узгодження інтересів та розподілу створюваної цінності між учасниками, користувачами і територіальними спільнотами. Його критерії охоплюють безпеку праці, якість внутрішнього середовища, доступність, прозорість комунікації, керованість конфліктів, участь заінтересованих сторін і суспільну прийнятність. Через цей вихід поведінкові та культурні передумови, сформовані у підрозділі 2.2, переводяться у вимірювані прояви.

Out5 «Організаційно-інноваційна стійкість» фіксує здатність підприємства підтримувати керованість за умов невизначеності, змінювати процедури без втрати функціональності, накопичувати знання та відтворювати інноваційні практики. У його складі поєднуються резильєнтність ланцюгів постачання, сценарна готовність, швидкість реагування на ризикові події, безперервність критичних процесів, інноваційна активність, навчання персоналу та здатність масштабувати результативні рішення.

Таблиця 2.19

Система критеріїв та індикативного ядра результатів економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами

Вихід	Критеріальний блок	Базові індикатори	Джерела даних	Управлінське використання
1	2	3	4	5
Індекс економічної ефективності (Out1)	Фінансова стійкість і вартісна керованість	рентабельність; операційний грошовий потік; відхилення бюджету; частка непередбачених витрат	фінансова звітність, бюджет проекту, договори	оцінка здатності фінансувати участь у проекті та утримувати цільовий бюджет
	Продуктивність і життєвоциклова цінність	виробіток; частка переробок; простої; LCC на 1 м ² ; відхилення строків	виробничі звіти, календар, кошторис, дані експлуатації	порівняння альтернатив за повною вартістю і надійністю виконання

Продовження табл. 2.19

1	2	3	4	5
Індекс цифрової зрілості (Out2)	Якість та простежуваність даних	повнота обов'язкових атрибутів; актуальність; частка об'єктів з унікальними ідентифікаторам; простежуваність версій	CDE, BIM, ERP, журнали змін, реєстри	визначення придатності даних до автоматизованого контролю і розрахунків
	Інтегрованість та автоматизація	частка інтегрованих процесів; кількість ручних повторних вводів; частка автоматизованих перевірок; час обміну	API, CDE, журнали систем, Model Checker	виявлення цифрової фрагментації та інформаційних вузьких місць
Індекс екологічної та біосферо-сумісної ефективності (Out3)	Вуглецево-ресурсна ефективність	life-cycle GWP; EUI; частка ВДЕ; відходи на 1 м²; частка повторного використання; водоспоживання	LCA, EPD/DPP, BIM-обсяги, лічильники, акти відходів	контроль карбонового і ресурсного бюджету, вибір матеріалів та технологій
	Біосферно-просторова сумісність	зміна проникності поверхні; водоутримання; частка відновленої площі; зв'язність зелених зон	GIS, кадастри, польові обстеження, супутникові дані	ранній скринінг розміщення та оцінка відновного ефекту проекту
Індекс стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості (Out4)	Безпека, здоров'я і доступність	частота травматизму; порушення безпеки; CO ₂ /PM _{2.5} ; тепловий та акустичний комфорт; універсальна доступність	журнали охорони праці, IoT/BMS, обстеження, аудити доступності	контроль умов праці й користування та адресні коригувальні дії
	Якість стейкхолдерської взаємодії	час погодження; кількість конфліктів; частка рішень з документованим залученням; скарги; задоволеність	протоколи, CDE/BCF, опитування, журнали звернень	оцінка прозорості, координації та суспільної прийнятності

Продовження табл. 2.19

1	2	3	4	5
Індекс організаційно-інноваційної стійкості (Out5)	Резильєнтність і безперервність	час реагування на ризик; частка ризиків із власником; резервність критичних постачань; тривалість відновлення	реєстр ризиків, договори, сценарні моделі, журнали інцидентів	стрес-тестування і підготовка планів безперервності
	Інноваційна та навчальна спроможність	частка процесів, поліпшених за результатами аналізу; інтенсивність навчання; швидкість масштабування пілотів; частка інноваційних рішень з підтвердженим ефектом	програми розвитку, реєстр поліпшень, портфель інновацій, звіти про пілоти	оцінка здатності переводити досвід у повторювані організаційні практики

Джерело: розроблено автором з урахуванням методологічних положень [135–145].

Перелік у табл. 2.19 є ядром, а не закритим каталогом. Його конкретизація залежить від ролі підприємства у проєктній екосистемі. Для виробника будівельної продукції більша деталізація необхідна щодо EPD, походження сировини, енергоємності та цифрового паспорта продукту; для генпідрядника – щодо логістики, відходів, строків, безпеки та as-built даних; для оператора – щодо фактичної енергії, води, якості внутрішнього середовища й технічного стану. Незмінними залишаються структура Out1–Out5 та правила доказовості, що забезпечує порівнянність підприємств з різними функціями без штучного ототожнення їх операційних KPI.

Індикативна система набуває управлінського змісту лише тоді, коли показник прив'язаний до моменту прийняття рішення. Для цього пропонується стадійно-шлюзова модель G1–G7, у якій перехід між етапами залежить не від формального завершення календарної фази, а від підтвердження набору обов'язкових умов: достатності даних, виконання критичних порогів, наявності відповідальних власників і документованого

рішення. Така модель переносить контроль з ретроспективної перевірки результату на попередження невідповідностей.

Шлюз G1 фіксує прийнятність контексту та базові просторово-екологічні обмеження. G2 формує базову лінію цілей, бюджетів і нормативних порогів. G3 забезпечує порівняння альтернатив із застосуванням LCC, LCA та багатокритеріального аналізу. G4 переводить обраний варіант у контрактні й інформаційні вимоги. G5 контролює фактичне виконання, матеріальні потоки, строки, зміни та відходи. G6 верифікує as-built стан і готовність цифрового паспорта. G7 переходить до експлуатаційного моніторингу, порівняння фактичних даних з базовою лінією і коригування режимів. У такий спосіб Out1–Out5 використовуються не як фінальний рейтинг, а як повторювана система управлінських сигналів (рис. 2.23).

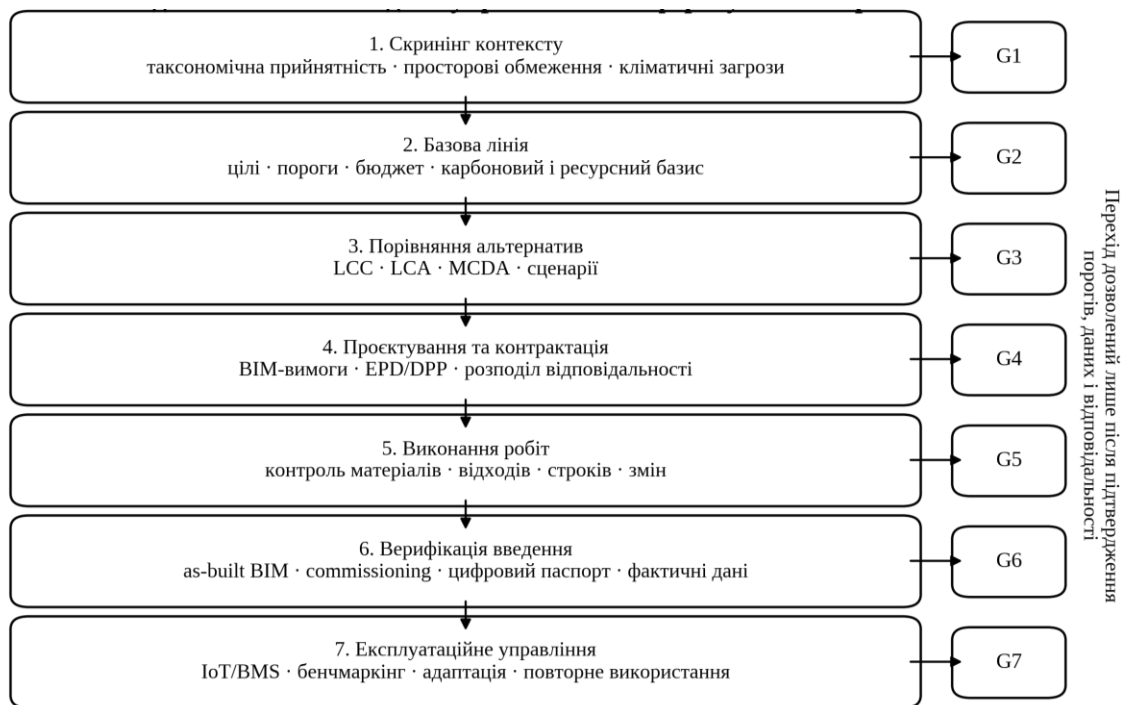


**Рис. 2.23. Стадійно-шлюзова модель управління проектом
біосферосумісного будівництва**

Джерело: розроблено автором.

У цифровому середовищі проблема оцінювання зміщується від дефіциту інформації до дефіциту її керованої доказовості. Великий обсяг даних сам по собі не підвищує достовірність висновку, якщо відсутні однозначні

ідентифікатори, правила версійності, метадані походження, контроль прав доступу та зв'язок між записом і управлінським рішенням. Тому в авторській методиці запроваджується коефіцієнт якості доказів q , який відображає ступінь довіри до джерела та процедури формування конкретного індикатора.

Найвищий рівень доказовості надається верифікованим фактичним даним або даним сертифікованих джерел. Контрольовані автоматизовані дані з BIM, CDE, BMS чи державного реєстру мають дещо нижчу оцінку, оскільки їх достовірність залежить від правил введення, калібрування та інформаційної дисципліни. Документально підтверджені розрахункові дані використовуються за відсутності фактичних значень, а регламентована експертна оцінка – лише для показників, які не можуть бути коректно отримані кількісним способом. Відсутність доказів прирівнюється до нульового коефіцієнта, а не до нейтрального значення (табл. 2.20).

Таблиця 2.20

Шкала коефіцієнта якості доказів для індикативного оцінювання

Рівень доказовості	Характеристика джерела	q	Приклади	Методичне трактування
Верифіковані і фактичні дані	незалежно перевірені вимірювання, сертифіковані дані, аудовані реєстри	1,00	лічильники з верифікацією; EPD; аудовані фінансові дані; незалежний аудит	повне врахування нормованого значення
Контрольовані автоматизовані дані	структуровані дані з контрольованої моделі або системи з журналом змін	0,85	CDE, BIM, BMS, реєстрові дані, автоматизований Model Checker	незначне зниження через залежність від якості інформаційного процесу
Документовані розрахункові дані	формалізований розрахунок з відтворюваними вихідними припущеннями	0,70	прогнозне LCA/LCC, енергомодель, сценарний бюджет	врахування з дисконтом за прогнозну природу
Регламентована експертна оцінка	оцінка за визначеною шкалою з фіксованим складом компетентних експертів	0,50	зрілість культури даних, якість взаємодії, інноваційна готовність	використання лише за неможливості прямого вимірювання
Відсутні або неперевірювані дані	джерело не встановлено, значення не відтворюється або не має підтвердження	0,00	декларативне твердження без документа або запису	індикатор не створює позитивного внеску в оцінку

Джерело: розроблено автором.

Запровадження q змінює саму логіку цифрової зрілості: підприємство не отримує високий результат за рахунок кількості цифрових сервісів, якщо вони не забезпечують доказової простежуваності. Це також запобігає нерівноцінності між підприємствами, одне з яких декларує високі показники на основі експертного опитування, а інше підтверджує їх автоматизованими або верифікованими даними.

Для проєкту біосферосумісного будівництва доцільно підтримувати наскрізний ланцюг ідентифікації: продукт або матеріал – його EPD чи цифровий паспорт – елемент інформаційної моделі – специфікація та закупівля – фактичне постачання – монтаж – експлуатаційний актив – демонтаж або повторне використання. Втрата зв'язку на будь-якій ланці послаблює достовірність LCA, ускладнює контроль гарантій і знижує потенціал циркулярного використання матеріалів. Регламент (ЄС) 2024/3110 та логіка CORENET X демонструють інституційне закріплення саме структурованих, інтероперабельних даних [138; 150].

Рис. 2.24 відображає узагальнену архітектуру інформаційно-аналітичної системи, у межах якої поєднано джерела даних, підсистеми їх збирання та обробки, аналітичний контур, інфраструктурне забезпечення та канали представлення результатів. Його використання дає змогу цілісно показати логіку перетворення первинних даних у аналітичний продукт, придатний для підтримки управлінських рішень і цифрової взаємодії користувачів.

Різномірність вихідних показників потребує приведення їх до безрозмірної шкали. Межі нормування не повинні автоматично визначатися мінімумом і максимумом досліджуваної вибірки, оскільки за слабкої вибірки найкраще фактичне значення може бути далеким від нормативного або технологічно досяжного рівня. Пріоритет має надаватися нормативним, цільовим, бенчмарковим або науково обґрунтованим межам L_j та U_j . Вибіркові min–max межі допускаються лише за відсутності зовнішнього орієнтира і підлягають перевірці чутливості.

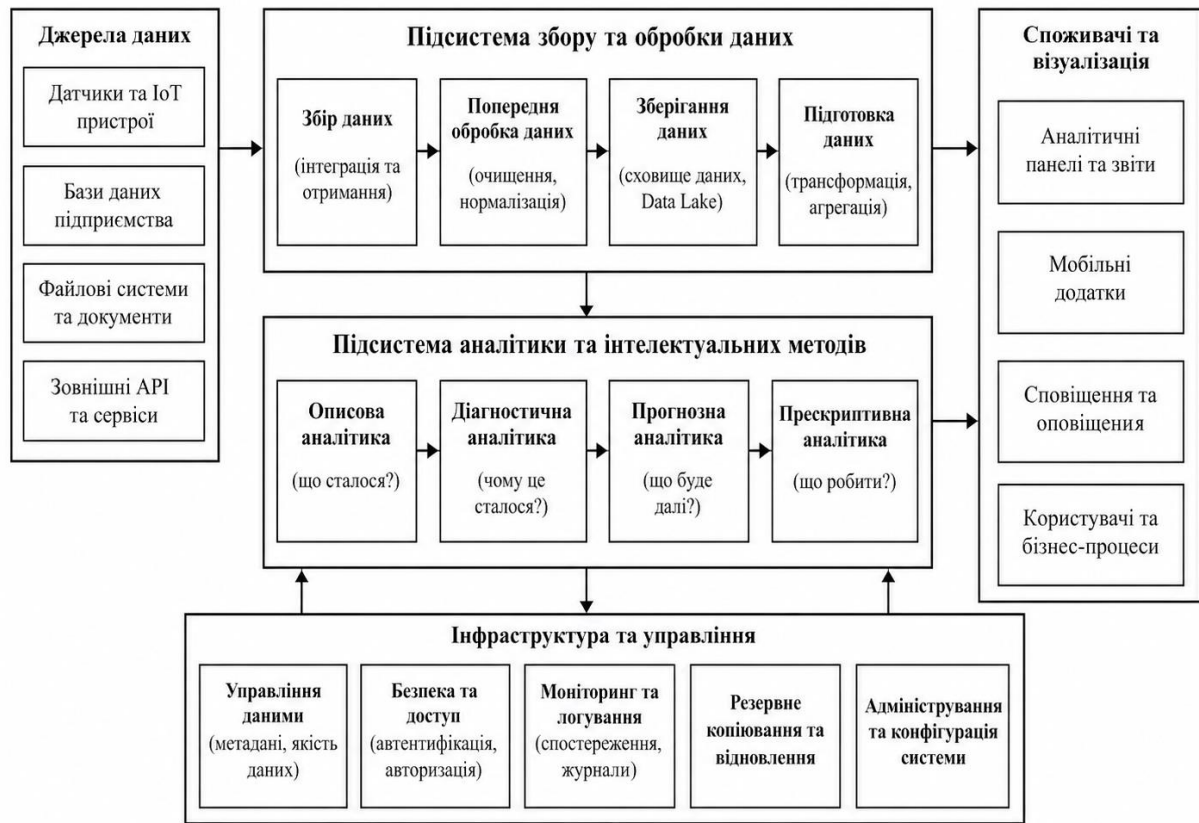


**Рис. 2.24. Архітектура цифрової доказовості управління проєктом
біосферосумісного будівництва**

Джерело: розроблено автором.

Для стимулюючого індикатора, збільшення якого відповідає поліпшенню стану, нормоване значення z_{ij} визначається як:

$$z_{ij} = (x_{ij} - L_j) / (U_j - L_j), \quad 0 \leq z_{ij} \leq 1 \quad (2.4)$$

Для дестимулюючого індикатора, зростання якого погіршує результат, використовується інверсна форма:

$$z_{ij} = (U_j - x_{ij}) / (U_j - L_j), \quad 0 \leq z_{ij} \leq 1 \quad (2.5)$$

Значення, що перевищують цільову верхню межу для стимулятора або є нижчими за цільову нижню межу для дестимулятора, обмежуються одиницею. Це запобігає надмірному внеску одного показника у сукупну оцінку. Після нормування вводиться поправка на якість доказової бази:

$$\tilde{z}_{ij} = z_{ij} \cdot q_{ij} \quad (2.6)$$

де q_{ij} набуває значень від 0 до 1 відповідно до табл. 2.20. Таким чином, нормування характеризує досягнутий стан, а q – ступінь довіри до його підтвердження. Розмежування цих двох величин методично необхідне: низька результативність і низька доказовість є різними управлінськими проблемами та потребують різних коригувальних дій.

Частковий індекс Out_k формується шляхом агрегування скоригованих нормованих індикаторів у межах відповідного результату:

$$Out_k = \sum_j w_{kj} \cdot \tilde{z}_{kj}, \quad \sum_j w_{kj} = 1 \quad (2.7)$$

Ваги w_{kj} визначаються всередині кожного виходу на основі поєднання нормативної значущості, експертного оцінювання та чутливості результату. Вони не повинні переноситися механічно між підприємствами з різними функціональними ролями. Наприклад, для оператора будівлі в $Out3$ більша вага може припадати на фактичне енергоспоживання, водокористування і внутрішнє середовище, тоді як для виробника матеріалів – на GWP продукції, походження сировини та циркулярність. Порівнянність забезпечується не тотожністю ваг кожного індикатора, а єдиною структурою $Out1–Out5$, прозорими правилами зважування та фіксацією рольового профілю.

Некомпенсаційні вимоги формалізуються шлюзовим коефіцієнтом G . Для кожного критичного порогу r задається $g_r \in \{0; 1\}$; значення 0 означає невиконання обов'язкової умови. Сукупний шлюз визначається як:

$$G = \prod_r g_r \quad (2.8)$$

Якщо хоча б одна критична умова не виконана, $G = 0$, що блокує позитивну інтегральну класифікацію незалежно від високих значень інших компонентів. До таких умов належать законність і безпека, встановлені нормативні екологічні межі, мінімальна достовірність даних, а для окремих типів проєктів – обов'язкові вимоги енергоефективності, доступності чи захисту біорізноманіття. Конкретний перелік шлюзів визначається типом об'єкта, правовим режимом та функцією підприємства.

Окремою вимогою є перевірка чутливості. Якщо помірна зміна ваг, меж нормування або коефіцієнта q істотно змінює позицію підприємства, інтегральний висновок не може вважатися стійким. У такому разі результат подається як інтервал або сценарний профіль, а управлінське рішення має спиратися на аналіз компонентів, що спричинили нестійкість. Це особливо суттєво для Out4 і Out5, де частка експертних або сценарних даних є вищою, ніж у фінансовому чи енергетичному контурі. Методичні правила підготовки індикаторів до формування Out1–Out5 надано в Додатку Г табл. Г.1.

Україна має базові правові передумови для зближення з європейською моделлю, проте вони сформовані переважно як окремі регуляторні контури. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» закріплює сертифікацію енергетичної ефективності та мінімальні вимоги до енергетичних характеристик [152], Закон «Про енергетичну ефективність» визначає ширші засади політики енергозбереження [153], а Закон «Про надання будівельної продукції на ринку» наближує правила декларування характеристик будівельної продукції до європейської моделі [154]. Концепція впровадження BIM-технологій формує нормативний вектор цифровізації інформаційних процесів у будівництві [18]. Законодавство про публічні закупівлі допускає використання вартості життєвого циклу як критерію оцінювання [156].

Проблема полягає не у відсутності окремих інструментів, а в недостатній методичній зв'язаності між ними. Енергетичний сертифікат, дані про будівельну продукцію, BIM-модель, екологічні розрахунки, закупівельні критерії та експлуатаційний моніторинг не утворюють єдиного життєвоциклового масиву, який супроводжував би об'єкт від задуму до повторного використання матеріалів. Через це одна й та сама характеристика може формуватися у різних документах за різними правилами або взагалі не передаватися між стадіями.

Порівняння з європейською рамкою виявляє чотири групи розривів. Перший є методичним: національна практика потребує уніфікованого

розрахунку life-cycle GWP будівлі з чітко визначеними межами, референтним періодом, правилами даних та процедурою верифікації, сумісною з оновленою рамкою EPBD [133; 137]. Другий – інформаційний: необхідна машинозчитувана зв'язка між характеристиками продукту, EPD або DPP, BIM-елементом, закупівлею, фактичним постачанням та експлуатаційним активом. Третій – інституційний: показники мають впливати на рішення про фінансування, закупівлю, дозвіл або перехід через проєктний шлюз. Четвертий – експлуатаційний: проєктні значення повинні порівнюватися з фактичними, а суттєве відхилення має запускати процедуру коригування.

Для українського контексту особливого значення набуває біосферно-просторова компонента. Євроінтеграційна адаптація не повинна звужуватися до енергоефективності та вуглецю. Масштаб відбудови створює одночасно можливість і ризик довгострокової зміни структури територій, водного режиму, зелених коридорів, проникності поверхонь і локальної кліматичної стійкості. Тому Out3 має використовуватися як ширший контур, де вуглецеві та ресурсні показники доповнюються індикаторами екосистемної сумісності й відновного ефекту (табл. 2.24).

Отже, адаптація має починатися не з механічного запозичення балів BREEAM, LEED чи інших систем, а зі створення інфраструктури вимірювання та доказовості. Нормативний поріг без доступних даних породжує формальне виконання; цифрова платформа без семантичної сумісності збільшує обсяг інформації, але не зменшує невизначеність; LCC без порівнянних екологічних показників не забезпечує біосферосумісного вибору. Послідовність реформ повинна враховувати ці залежності.

Першим положенням є пріоритет методичної конвергенції над формальним посиленням порогів. До встановлення жорстких граничних значень необхідно забезпечити порівнянність розрахунків, національні або визнані зовнішні джерела даних, правила верифікації та достатню кількість пілотних об'єктів для формування бенчмарків. Це особливо стосується life-

cycle GWP, де результат істотно залежить від меж системи, строку аналізу, сценаріїв заміни, енергетичного міксу та якості продуктових даних.

Таблиця 2.24

Методологічні розриви між чинним інструментарієм України та цільовою європейською моделлю

Напрямок	Наявна передумова в Україні	Цільова характеристика	Виявлений розрив	Необхідний методичний результат
Енергетична та вуглецева ефективність	Енергетична сертифікація та мінімальні вимоги [152; 153]	Life-cycle GWP у зв'язці з енергетичним сертифікатом [133; 137]	Операційна енергія і вуглець життєвого циклу методично роз'єднані	Національна методика life-cycle GWP та порівнянні бенчмарки
Будівельна продукція і дані	Декларування показників продукції [154]	DPP, машинозчитувані дані, BIM-інтероперабельність [138]	Немає наскрізної простежуваності продукт–BIM–закупівля–актив	Єдиний словник властивостей, ідентифікатори та цифровий паспорт
BIM та погодження	Концепція впровадження BIM [18]	Модельно-орієнтована перевірка та openBIM-подання [150]	Цифровізація може відтворювати документну логіку без реінжинірингу процесу	Типові інформаційні вимоги, CDE і автоматизовані правила перевірки
Публічні закупівлі	Можливість застосування LCC [156]	LCC та GWP доказові екологічні критерії	Екологічні параметри недостатньо пов'язані з оцінкою економічної цінності	Типова методика багатокритеріальної оцінки за життєвим циклом
Експлуатаційна результативність	Локальні системи енергоменеджменту та лічильники	Регулярний фактичний бенчмаркінг [151]	Проектні значення не утворюють наскрізної базової лінії для експлуатації	Реєстрова модель фактичних KPI і процедура коригування
Біосферно-просторова сумісність	Окремі екологічні та містобудівні процедури	Інтеграція кліматичних, водних, екосистемних і просторових індикаторів	Ефекти території оцінюються фрагментарно та не інтегруються в Out3	Єдина GIS-орієнтована матриця біосферних KPI для раннього скринінгу

Джерело: авторське узагальнення за [18, 133–138; 150–156].

Другим положенням є «дані один раз – багаторазове використання». Інформація про продукт, матеріал, елемент і актив має формуватися у

структурованому вигляді та повторно використовуватися для LCA, LCC, кошторису, закупівель, перевірки відповідності, експлуатації й майбутнього демонтажу. Це потребує спільних ідентифікаторів, словника властивостей і відкритих форматів обміну. Економічний ефект такого рішення проявляється через скорочення повторного введення, часу перевірки та вартості інформаційної координації, тому воно одночасно впливає на Out1 і Out2.

Третім положенням є умовність публічного фінансування та закупівель за життєвоцикловою цінністю. Для проєктів визначеного масштабу доцільно поетапно перейти від порівняння початкової ціни до обов'язкового зіставлення LCC, GWP, ресурсних і експлуатаційних параметрів. Екологічна декларація або цифровий паспорт продукту в такій моделі стають не інформаційним додатком, а елементом доказу відповідності закупівельному критерію.

Четвертим положенням є розділення проєктної та фактичної результативності. Після введення об'єкта в експлуатацію мають зберігатися базові проєктні значення Out3 і релевантних компонентів Out4, з якими порівнюються реальні дані. Позитивна оцінка проєктного рішення не повинна залишатися незмінною за стійкого розриву між прогнозованою й досягнутою ефективністю. Така логіка зближує управління з практикою регулярного бенчмаркінгу [151].

П'ятим положенням є обов'язковість раннього біосферно-просторового скринінгу для великих відбудовчих і девелоперських проєктів. Рішення про розміщення та просторову конфігурацію мають оцінюватися до фіксації значної частини проєктних витрат, оскільки на пізніх стадіях можливість змінити вплив на водний режим, зелену зв'язність чи тепловий острів різко зменшується. Шостим положенням є шлюзове управління, за якого відповідальність за доказовість та досягнення порогів фіксується до переходу між стадіями, а не після виявлення невідповідності [277].

Перехід України до європейської моделі сталого будівництва потребує не механічного перенесення окремих нормативних вимог, а формування

узгодженої архітектури державного регулювання, проєктного управління, цифрового обміну даними та економічного стимулювання біосферосумісних рішень. Наявні інституційні розриви доцільно усувати за напрямками, які одночасно забезпечують нормативну сумісність із вимогами ЄС, життєвоциклове оцінювання будівельних активів, простежуваність матеріальних і вуглецевих потоків, цифрову доказовість та відповідальність підприємств-стейкхолдерів за досягнуті результати. За такого підходу адаптація розглядається не як сукупність ізольованих регуляторних змін, а як послідовна трансформація інституційного середовища, у якому екологічні параметри безпосередньо впливають на проєктування, фінансування, закупівлі, контракування, будівництво та експлуатацію об'єкта. Пріоритетні напрями такої трансформації систематизовано в таблиці 2.21.

Наведені у таблиці напрями формують на державному рівні основу для переходу від фрагментарного регулювання окремих екологічних характеристик будівництва до узгодженої моделі управління результативністю будівельного активу протягом його життєвого циклу. Їх реалізація дає змогу пов'язати технічне регулювання, містобудівну політику, публічні закупівлі, фінансові стимули, екологічні вимоги та цифрові державні системи через єдині критерії, показники й правила підтвердження даних. На цій основі може бути сформований державний регуляторно-інформаційний контур, у якому відповідність проєкту визначатиметься не лише наявністю дозвільної документації, а й досягненням установлених параметрів енергоефективності, GWP, ресурсної циркулярності, поводження з відходами, біорізноманіття та життєвоциклової вартості. Одночасно виникають передумови для інтеграції екологічної результативності у механізми державного фінансування, відбору проєктів, зелених закупівель і контролю використання публічних та донорських коштів. Така конструкція дозволяє державі перейти від переважно дозвільно-контрольної моделі до управління цільовими параметрами трансформації будівельного сектору.

Таблиця 2.21

**Пріоритетні напрями адаптації управління біосферосумісними
будівельними проєктами в Україні**

Напрямок	Форма реалізації	Відповідальні контури	Орієнтовний горизонт	Очікуваний управлінський результат
Методика life-cycle GWP	Національна методика, правила меж, даних і верифікації	державна політика, стандартизація, професійна верифікація	2026–2027	порівнянні значення GWP і підготовка до вимог EPBD
Інфраструктура EPD/DPP	Реєстр, словник властивостей, підтримка виробників, відкриті формати	виробники, органи технічного регулювання, цифрові платформи	2026–2028	доступні верифіковані дані для LCA, BIM і закупівель
BIM-вимоги до публічних проєктів	Типові EIR, CDE, IFC-вимоги, модельно-орієнтовані перевірки	замовники, проєктувальники, інформаційні менеджери	2026–2028	скорочення цифрової фрагментації та повторного введення
Життєвоциклові закупівлі	Методика LCC, GWP-пороги, доказові екологічні критерії	публічні замовники, фінансові та контрольні органи	2027–2029	перенесення попиту на рішення з нижчою повною вартістю і впливом
Біосферні KPI раннього скринінгу	GIS-модуль водних, просторових, екосистемних і кліматичних показників	громади, замовники, планувальники, екологи	2027–2029	виявлення просторових ризиків до фіксації проєктної конфігурації
Експлуатаційний бенчмаркінг	Щорічне розкриття нормованих фактичних показників для визначених об'єктів	оператори, енергоменеджмент, власники активів	2028–2030	верифікація фактичного ефекту і запуск коригувальних дій
Міжресурсова інтеграція та цифровий паспорт будівлі	Спільні ідентифікатори об'єкта, продуктів і проєкту; API-обмін	державні цифрові системи, замовники, оператори	2028–2032	наскрізна простежуваність даних життєвого циклу
Професійні компетентності	Освітні програми та професійні стандарти LCA, BIM, data governance, біосферного оцінювання	ЗВО, професійні організації, роботодавці	2026–2030	здатність ринку виконувати нові методики без формального комплаєнсу

Джерело: розроблено автором на основі [15-18, 133–139; 152–156].

Запропонована послідовність не є календарним прогнозом нормативних рішень, а відображає залежність між спроможностями. Перехід до наступного

етапу доцільний лише за підтвердженої готовності попереднього: неможливо масштабувати GWP-пороги без доступних продуктових даних, а цифровий паспорт не створює управлінської цінності без спільних ідентифікаторів та інтеграції з інформаційною моделлю. Саме тому часові інтервали у табл. 2.21 мають трактуватися як орієнтовні горизонти формування спроможностей, а не як нормативно встановлені строки.

З позицій біосферосумісного будівництва запропоновані напрями створюють інституційні умови для зміщення об'єкта управління з окремої будівлі як завершеного фізичного продукту на її повний життєвий цикл і систему взаємодії з природним середовищем. До управлінського контуру включаються походження та ресурсомісткість матеріалів, втілений і операційний вуглець, енергоспоживання, водокористування, вплив на біорізноманіття, ремонтпридатність, розбірність, повторне використання компонентів та сценарії завершення життєвого циклу. Внаслідок цього біосферосумісність набуває не декларативного, а параметричного змісту: відповідні характеристики можуть бути закріплені у технічному завданні, цифровій моделі об'єкта, тендерних критеріях, договорах, системі моніторингу та процедурах прийняття управлінських рішень. Для підприємств-стейкхолдерів така інституційна трансформація формує єдині правила участі у проєктній екосистемі та стимулює перехід від виконання мінімальних екологічних нормативів до управління довгостроковою економічною, ресурсною й біосферосумісною результативністю будівельних проєктів. На основі таблиці сформовано дорожню карту інституційної адаптації України, яка поєднує державне регулювання з економіко-цифровими механізмами управління підприємствами-стейкхолдерами та створює передумови для інтеграції українського будівельного сектору до європейського простору сталого будівництва (рис. 2.25).



Рис. 2.25. Дорожня карта адаптації України до європейської моделі управління біосферосумісним будівництвом

Джерело: розроблено автором.

Проведений аналіз дозволив запропонувати науково-методичний інструментарій оцінювання економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами, ядром якого є індикативно-критеріальна система, що поєднує економічну результативність, цифрову зрілість управління, екологічну та біосферосумісну ефективність, стейкхолдерно-людиноцентричну орієнтованість і організаційно-інноваційну стійкість. Склад індикаторів узгоджено з фазами життєвого циклу проєкту, джерелами інформації та суб'єктами відповідальності за дані, а самі показники диференційовано за ознаками результату, процесу й доказовості. Методичний контур оцінювання охоплює нормування та зважування показників, аналіз життєвого циклу й вартості життєвого циклу, багатокритеріальне оцінювання, сценарне моделювання та аналіз чутливості, що дає змогу ідентифікувати структурні дисбаланси та визначати обґрунтовані траєкторії управлінського

впливу. До інструментарію включено некомпенсаційні критичні обмеження безпекового, екологічного, нормативного та інформаційного характеру, за яких перевищення встановлених порогів за окремими параметрами не може бути нівельоване високими фінансовими або цифровими результатами. Такий принцип змінює логіку інтегрального оцінювання: прийнятність економіко-цифрової моделі визначається не лише рівнем її результативності, а й дотриманням мінімально допустимих вимог щодо безпеки, екологічної відповідальності, нормативної відповідності та якості даних. У цій конструкції біосферосумісність розглядається не як додатковий критерій оцінки, а як формалізована умова допустимості управлінського рішення.

Структурно-логічна модель науково-методичного інструментарію відображає послідовний перехід від первинних даних і доказової бази до нормованих індикаторів, інтегрованого оцінювання та диференційованих управлінських рішень з урахуванням установлених некомпенсаційних критичних обмежень (рис. 2.26).

Запропонована модель фіксує відмінність інструментарію від традиційного адитивного оцінювання. Економічна результативність, цифрова зрілість, екологічна та біосферосумісна ефективність, стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість і організаційно-інноваційна стійкість формують взаємозалежний оцінювальний профіль підприємства-стейкхолдера, однак високі значення окремих компонентів не можуть компенсувати порушення критичних умов. Уведення некомпенсаційних обмежень забезпечує відсікання станів, несумісних із вимогами безпеки, нормативної відповідності, достовірності даних і біосферосумісності, тоді як інтегральна оцінка використовується для діагностики, порівняння та визначення траєкторії управлінського реагування. Тим самим оцінювання набуває не лише діагностичної, а й проєктувальної функції, оскільки його результати безпосередньо формують вхідні параметри подальшого економіко-цифрового моделювання.

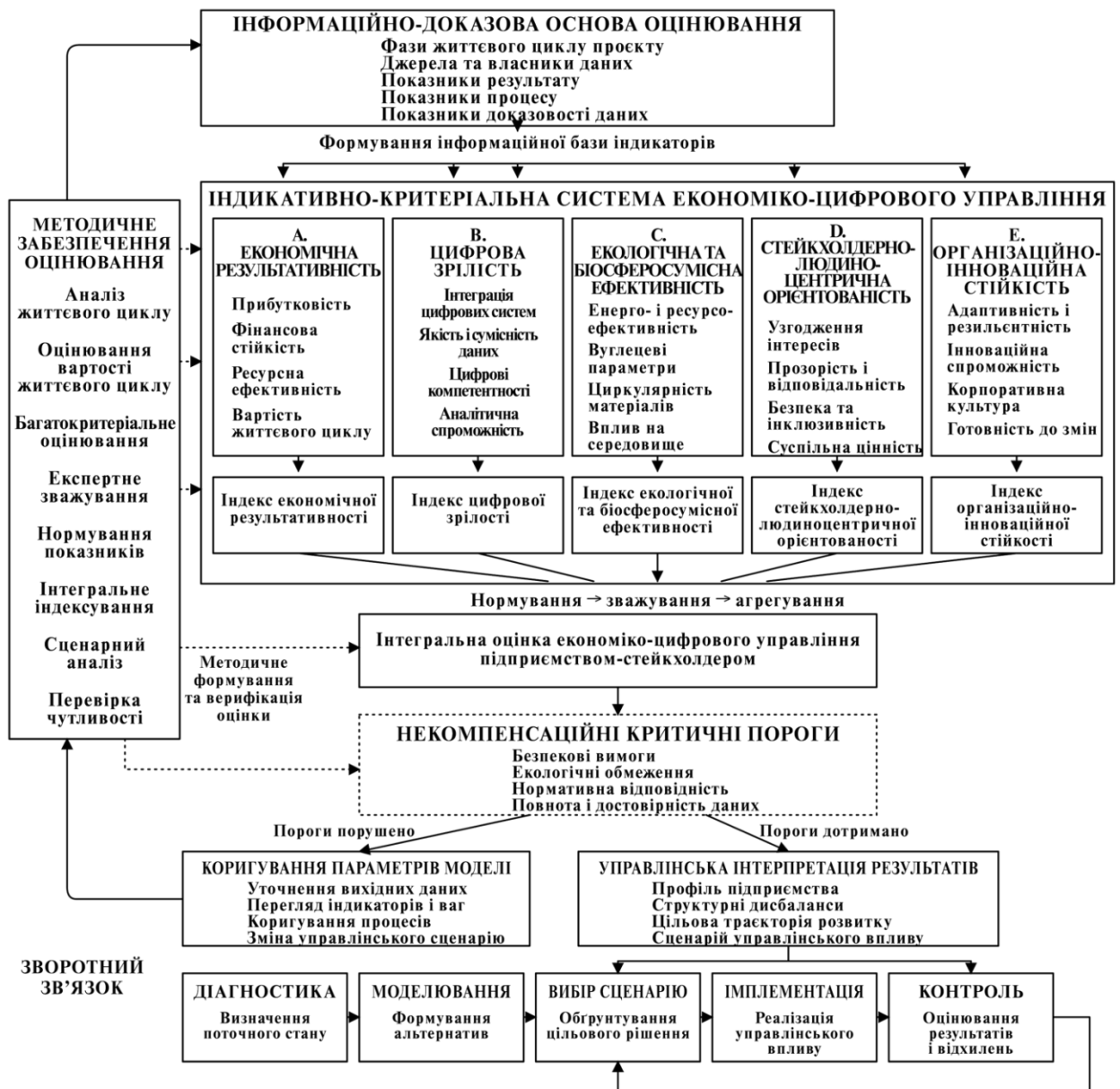


Рис. 2.26. Структурно-логічна модель науково-методичного інструментарію оцінювання економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва

Джерело: розроблено автором.

Сформована система створює методологічний перехід до подальшої формалізації економіко-цифрових моделей. Проведене методологічне узагальнення показало, що оцінювання економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва не може будуватися як проста сума фінансових, цифрових та екологічних КРІ.

Об'єктом вимірювання є управлінська спроможність підприємства створювати економічну цінність у цифрово простежуваному, біосферосумісному, людиноцентричному та резильєнтному середовищі.

Висновки до розділу 2

1. Розвинено методологічне трактування стійкості та резильєнтності підприємств-стейкхолдерів проєктів біосферосумісного будівництва шляхом розмежування здатності утримувати допустимі параметри функціонування та здатності перебудовувати конфігурацію ресурсів, компетентностей, даних і міжорганізаційних зв'язків під впливом збурень. Резильєнтність у такому розумінні характеризує не повернення підприємства до попереднього стану, а послідовність «передбачення – реагування – реконфігурація – трансформація», результатом якої може бути формування якісно нової управлінської спроможності. Сформовано методологічний конструкт, що поєднує фінансову, операційну, інвестиційно-інноваційну, організаційну, інформаційно-цифрову та екосистемну складові стійкості з динамічними компонентами резильєнтності. Для відокремлення внутрішньої спроможності підприємства від стану галузевого середовища запропоновано контекстний вектор резильєнтності, який охоплює виробничо-циклічний, структурно-попитовий, інвестиційно-капітальний, трудово-компетентнісний і фінансово-адаптивний контури. Така конструкція дає змогу інтерпретувати однакові внутрішні показники підприємства диференційовано залежно від фази та глибини зовнішніх збурень.

2. Аналітичне дослідження будівельної галузі України встановило асиметричність її відновлення та обґрунтувало необхідність розмежування швидкості поточної адаптації й повноти відновлення виробничої спроможності. Після різкого скорочення 2022 року позитивна динаміка 2023–2024 років характеризує відновлення активності з низької бази, тоді як фізичний обсяг будівельної продукції у 2024 році становив лише близько 52,2

% рівня 2021 року, за номінального показника 81,4 %. Виявлена розбіжність доводить методичну недостатність вартісних показників без урахування цінового, структурного та циклічного контексту. Одночасно зафіксовано інфраструктуризацію попиту: у 2024 році на інженерні споруди припадало 58,3 % будівельної продукції, на нежитлові будівлі – 28,6 %, тоді як частка житлового сегмента зменшилася до 13,1 %. Така реконфігурація змінює вимоги до підприємств-стейкхолдерів у напрямі зростання капіталомісткості, складності контрактної взаємодії, цифрової координації, життєвоциклової простежуваності та управління розподіленою відповідальністю.

3. Встановлено ресурсний розрив між масштабом відновлювального попиту та спроможністю підприємств забезпечувати його необхідним капітальним і трудовим потенціалом. Номінальний обсяг капітальних інвестицій у будівництво у 2024 році не досяг рівня 2021 року, а їх частка у загальному обсязі інвестицій економіки знизилася до 6,70 %. Кількість найманих працівників у будівництві за 2010–2024 роки скоротилася на 57,4 %, що посилює залежність проєктів від дефіцитних компетентностей, субпідрядних мереж і цифрової координації розподілених команд. Позитивне фінансове сальдо галузі також не свідчить про однорідне відновлення, оскільки воно формується за одночасної значної частки збиткових підприємств і майже врівноважених потоків прибутків та збитків. На цій підставі обґрунтовано, що оцінювання спроможності підприємства-стейкхолдера не може спиратися на один показник прибутковості, масштабу чи чисельності персоналу, а має враховувати ліквідність, якість грошового потоку, резерви, компетентнісний профіль, цифрову інтегрованість, стійкість партнерських зв'язків і здатність фінансувати довгострокові екологічні зобов'язання.

4. Уточнено зміст інноваційно-екологічної корпоративної культури підприємства-стейкхолдера як міжорганізаційної управлінської здатності, а не лише сукупності внутрішніх цінностей персоналу або формальних екологічних політик. Її структурну репрезентацію сформовано через

взаємозв'язок ціннісно-нормативної орієнтації, управлінської інституціоналізації, компетентностей, цифрової доказовості, життєвоциклового управління та стейкхолдерської узгодженості. Встановлено, що екологічні й інноваційні орієнтири набувають управлінського змісту лише тоді, коли вони трансформуються у контрактні вимоги, критерії відбору партнерів, цифрові правила, власників даних, контрольні показники та процедури коригування. Міжнародне порівняння дало змогу виокремити регуляторно-таксономічну, стандартизаційно-верифікаційну, циркулярно-екосистемну, екоінноваційно-цифрову та проєктно-життєциклову моделі інституціоналізації культури. Для України обґрунтовано комбіновану конфігурацію, що поєднує європейську нормативну прозорість і життєвоциклову доказовість, азійську дисципліну виконання та масштабування стандартів, американську ринкову мотивацію й корпоративне лідерство.

5. Доведено, що інноваційно-екологічна культура має некомпенсаційний характер: високий рівень екоінноваційності не компенсує низької циркулярності матеріальних потоків, поширення сертифікованих систем менеджменту не усуває недостатньої цифрової інтеграції, а високий рівень перероблення відходів не є еквівалентним збереженню функціональної та економічної цінності матеріалів. З огляду на це циркулярність у біосферосумісному будівництві запропоновано трактувати через життєвоцикловий контур «ресурс – будівельний актив – збереження цінності – повторне використання – новий цикл». На цій основі обґрунтовано модульну архітектоніку адаптації міжнародних моделей до української проєктної екосистеми, що охоплює інституційний, корпоративний, стейкхолдерський, цифрово-інформаційний, життєвоцикловий і результативний модулі. Їх взаємодія забезпечує перехід від формального дотримання екологічних вимог до їх інтеграції у стратегію, бюджетування, проєктування, закупівлі, цифрові дані, мотивацію та контроль фактичних результатів.

6. Сформовано індикативно-критеріальну систему економіко-цифрового управління, яка операціоналізує результати попередніх методологічних розробок через п'ять взаємопов'язаних результуючих компонентів: економічну результативність, цифрову зрілість, екологічну та біосферосумісну ефективність, стейкхолдерно-людиноцентричну орієнтованість, організаційно-інноваційну стійкість. Систему побудовано за принципами мінімально достатнього індикативного ядра, життєвоциклової релевантності, атрибутованої відповідальності, доказової диференціації, динамічної відтворюваності та некомпенсаційності критичних вимог. Індикатори пов'язано з фазою життєвого циклу, джерелом інформації, власником первинних даних, суб'єктом розрахунку й верифікації та власником управлінського рішення, що переводить оцінювання з набору KPI у регламентований механізм формування управлінських сигналів.

7. Запропоновано стадійно-шлюзову модель G1–G7, яка інтегрує індикативне оцінювання у життєвий цикл проєкту та переносить контроль із постфактум-фіксації відхилень на попередження незворотних рішень. Перехід між фазами пов'язано з підтвердженням достатності даних, виконанням критичних порогів, наявністю визначених власників відповідальності та документованого рішення. Цифрову інфраструктуру при цьому трактовано як середовище доказовості, у якому BIM, CDE, ERP, EPD, цифрові паспорти, BMS, GIS та інші інформаційні джерела мають забезпечувати наскрізну простежуваність походження, версійності, актуальності та використання даних.

8. Порівняння міжнародного та українського інструментарію виявило, що основним обмеженням національної системи є не відсутність окремих нормативних або цифрових елементів, а їх методична, інформаційна, інституційна та експлуатаційна фрагментарність. Обґрунтовано послідовність адаптації, яка передбачає формування національної методики life-cycle GWP та бенчмарків, розвиток інфраструктури EPD і цифрових паспортів продукції, нормативне закріплення BIM-вимог і спільного середовища даних для

публічних проєктів, застосування LCC і доказових екологічних критеріїв у закупівлях, упровадження біосферно-просторових КРІ раннього скринінгу, експлуатаційного бенчмаркінгу та міжреєстрової інтеграції. Така послідовність створює передумови переходу від переважно дозвільно-контрольної моделі до управління цільовими параметрами біосферосумісної трансформації будівельного сектору.

9. Узагальнення одержаних результатів дозволило сформувати цілісний методологічний базис економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами, у якому стійкість і резильєнтність визначають здатність системи зберігати та реконфігурувати проєктну спроможність, інноваційно-екологічна корпоративна культура забезпечує поведінкове й інституційне відтворення відповідних норм, а індикативно-критеріальна система переводить їх у вимірювані параметри. Структурно-логічна модель науково-методичного інструментарію замикає цей зв'язок у послідовність «дані та докази – нормування – компонентне оцінювання – перевірка критичних обмежень – управлінське рішення – коригування», завдяки чому оцінювання виконує не лише діагностичну, а й проєктувальну функцію.

РОЗДІЛ 3

ІНСТРУМЕНТАЛЬНО-ЦИФРОВІ КОНТУРИ УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВАМИ-СТЕЙКХОЛДЕРАМИ ПРОЄКТІВ БІОСФЕРОСУМІСНОГО БУДІВНИЦТВА

3.1. Інституціоналізація ESG-принципів і корпоративної соціальної відповідальності в управлінні підприємствами-стейкхолдерами

Перехід від методологічного конструювання індикативно-критеріальної системи до її інституційного використання потребує пояснення того, яким чином зовнішні екологічні, соціальні та управлінські вимоги набувають сили внутрішніх правил підприємства-стейкхолдера. Наявність показника, цифрової платформи або корпоративної політики не гарантує зміни управлінської поведінки. Регуляторний припис стає дієвим лише після закріплення відповідального суб'єкта, параметричної директиви, джерела фактичних даних, критичного порога, процедури перевірки та визначеного наслідку для проектного рішення.

Будівельна екосистема ускладнює таку трансформацію через тривалий життєвий цикл об'єкта, значну матеріаломісткість, розподіленість впливів і тимчасовий характер проектних коаліцій. Вуглецевий слід залежить від рішень проєктувальника, властивостей продукції, логістики, способу виконання робіт і майбутньої експлуатації. Безпека праці визначається не лише корпоративними регламентами генерального підрядника, а й практиками субпідрядників, мобільних бригад та постачальників техніки. Відповідальність за результат тому має одночасно корпоративний, проєктний і міжорганізаційний характер.

Корпоративна соціальна відповідальність формує ціннісну готовність підприємства добровільно враховувати інтереси працівників, громад і довкілля. Її проявами є соціальні програми, благодійні ініціативи, підтримка персоналу, екологічні декларації та взаємодія з територіальними громадами.

ESG-орієнтоване управління не заперечує цю основу, але переводить її у режим керування впливами, ризиками та можливостями на підставі зіставних даних, формалізованих цілей і визначених управлінських наслідків.

Для підприємства-стейкхолдера відмінність має операційний зміст. Загальна декларація безпечних умов праці не замінює цифрово підтверджуваного допуску субпідрядника, обліку інцидентів і перевірки коригувальних дій. Екологічна політика не замінює вуглецевого бюджету, матеріального паспорта, маршруту відходів і порогів невідповідності. Соціальна програма не компенсує порушення прав працівників у ланцюгу виконання робіт.

Інституціоналізацію ESG-принципів запропоновано трактувати як процес перетворення екологічних, соціальних та управлінських орієнтирів на відтворювані правила економіко-цифрового управління, забезпечені нормативною закріпленістю, визначеним власником відповідальності, простежуваними даними, верифікацією та наслідками відповідності або невідповідності. Предметом оцінювання стає щільність причинно-логічних зв'язків між вимогою та рішенням, а не кількість політик або звітних показників.

Методологічне розмежування двох управлінських логік наведено в таблиці 3.1. Воно визначає, які елементи корпоративної соціальної відповідальності зберігають ціннісну функцію, а які мають бути перетворені на параметричні директиви та цифрові докази. Аналіз обґрунтовує перехід від ціннісної декларації до регламентованого управлінського впливу. Корпоративна соціальна відповідальність залишається мотиваційною основою, тоді як ESG забезпечує операціоналізацію цієї мотивації через критерії, дані, пороги та процедури реагування.

Європейська інституційна архітектура поєднує корпоративну звітність, класифікацію сталої діяльності, належну обачність у ланцюгах діяльності, енергетичне регулювання будівель, вимоги до будівельної продукції та зелені закупівлі. Відмінною ознакою є перехід від загальних декларацій до технічних

критеріїв, цифрового маркування, засвідчення та зв'язку з фінансовими рішеннями [59; 112–113; 133; 145; 157–160].

Таблиця 3.1

Методологічні відмінності корпоративної соціальної відповідальності та ESG-орієнтованого управління

Ознака	Корпоративна соціальна відповідальність	ESG-орієнтоване управління	Значення для будівельного проєкту
Домінуюча логіка	Добровільні зобов'язання та суспільна корисність	Управління впливами, ризиками і можливостями	Перехід від окремих ініціатив до проєктних критеріїв
Об'єкт уваги	Репутація, працівники, громади, довкілля	Подвійна суттєвість, ланцюг створення цінності, фінансові наслідки	Охоплення замовника, підрядників, постачальників та експлуатації
Форма закріплення	Кодекси, програми, соціальні й екологічні проєкти	Політики, KPI, пороги, контракти, стандарти даних	Включення вимог у тендер, договір, бюджет і контроль
Доказовість	Переважно описова або вибіркова	Методики, кількісні та якісні дані, засвідчення	Перевірюваність викидів, ресурсів, відходів і безпеки
Часовий горизонт	Поточні програми та комунікації	Стратегія, перехідні плани, життєвий цикл	Урахування експлуатації, ремонту, демонтажу і повторного використання
Наслідок невідповідності	Переважно репутаційний	Фінансовий, контрактний, регуляторний	Коригування проєкту, резерв, санкція або зміна партнера

Джерело: розроблено автором.

Регламент (ЄС) 2020/852 установив шість екологічних цілей, принцип суттєвого внеску, вимогу «не завдавати значної шкоди» та мінімальні соціальні гарантії [16]. CSRD і ESRS інституціоналізували подвійне оцінювання суттєвості, за якого враховуються вплив підприємства на людей і довкілля та фінансовий вплив факторів сталого розвитку на підприємство [17; 59]. Директива (ЄС) 2024/1760 поширила належну обачність на ланцюги діяльності [160], а EPBD 2024 посилила життєвоцикловий вимір будівель через траєкторію нульових викидів і поступове розкриття GWP [133].

Директива (ЄС) 2026/470 звузила безпосередню сферу обов’язкової CSRD-звітності до підприємств із понад 1000 працівників і чистим річним оборотом понад 450 млн євро, одночасно змінивши окремі вимоги CSDDD [159]. Зменшення кількості безпосередньо зобов’язаних суб’єктів не усуває каскадного інформаційного тиску: великі замовники, банки та інвестори продовжують потребувати даних від менших постачальників для власної оцінки ризиків, таксономічної відповідності й належної обачності.

Еволюцію інституційної архітектури узагальнено на рис. 3.1. Хронологія показує поступовий перехід від нефінансового опису до цифрово підтверджуваного управління впливами, ризиками та характеристиками будівельного активу. Кожний наступний акт не заміщує попередній, а розширює предмет відповідальності: від розкриття інформації – до таксономічних порогів, подвійної суттєвості, життєвоциклових параметрів, цифрової простежуваності та належної обачності у ланцюгах діяльності.



Рис. 3.1. Еволюція інституційної архітектури ESG-звітності та сталого будівництва в ЄС і Україні

Джерело: систематизовано автором за [59; 133; 157–159; 181–182].

Управлінську проєкцію основних інституційних елементів наведено в таблиці 3.2. Порівняння показує, що кожна нормативна рамка набуває змісту лише після її перетворення на проєктний критерій і цифровий артефакт.

Виявлено спільний інституційний каркас: нормативний акт визначає предмет відповідальності, підприємство формалізує параметричну директиву, а проєктна система закріплює її у даних, процедурах допуску та контрольних рішеннях.

Таблиця 3.2

Управлінська проєкція основних елементів європейської ESG-архітектури на підприємства-стейкхолдери будівництва

Інституційний елемент	Предмет регулювання	Вимога до підприємства	Проєктний наслідок
Таксономія ЄС	Класифікація екологічно сталої діяльності	Доведення суттєвого внеску, DNSH і мінімальних гарантій	Відбір технічних рішень, матеріалів і капітальних витрат
CSRD та ESRs	Стандартизована звітність зі сталого розвитку	Подвійна суттєвість, політики, цілі, показники, засвідчення	Наскрізний набір даних від проєктування до експлуатації
CSDDD	Належна обачність щодо прав людини і довкілля	Ідентифікація та реагування на негативні впливи у ланцюгу діяльності	Контроль субпідрядників, постачальників, умов праці та екологічних ризиків
EPBD 2024	Енергетична і вуглецева результативність будівель	Нульові викиди, реновація, життєвоцикловий GWP	Порівняння альтернатив за операційним і втіленим вуглецем
CPR 2024	Характеристики будівельної продукції і цифровий паспорт	Структуровані та машинозчитувані дані про продукцію	Простежуваність матеріалу від виробника до експлуатації
Зелені закупівлі	Екологічні критерії та вартість життєвого циклу	Технічні специфікації, LCC і підтвердження	Перетворення ESG-вимог на критерії допуску і оцінювання
Інституційний елемент	Предмет регулювання	Вимога до підприємства	Проєктний наслідок

Джерело: систематизовано автором за [16,17, 133; 145; 159, 160].

Масштаб екологічного навантаження визначає високу суттєвість будівельної діяльності для ESG-управління. За даними UNEP, у 2023 році сектор будівель і будівництва споживав 32 % світової енергії та формував 34 % глобальних викидів CO₂; матеріали на основі цементу і сталі були пов'язані з 18 % глобальних викидів [14]. У ЄС енергоспоживання будівель сформувало близько третини енергетично пов'язаних викидів [177]. Корпоративний ESG-

контур, обмежений енергетичними рахунками, не охоплює матеріаломісткість, вуглецевий бюджет, відходи та сценарій завершення життєвого циклу.

Для обґрунтування багатоконтурного характеру екологічної відповідальності здійснено візуалізацію щодо масштабу екологічного навантаження будівель і будівництва (рис. 3.2)

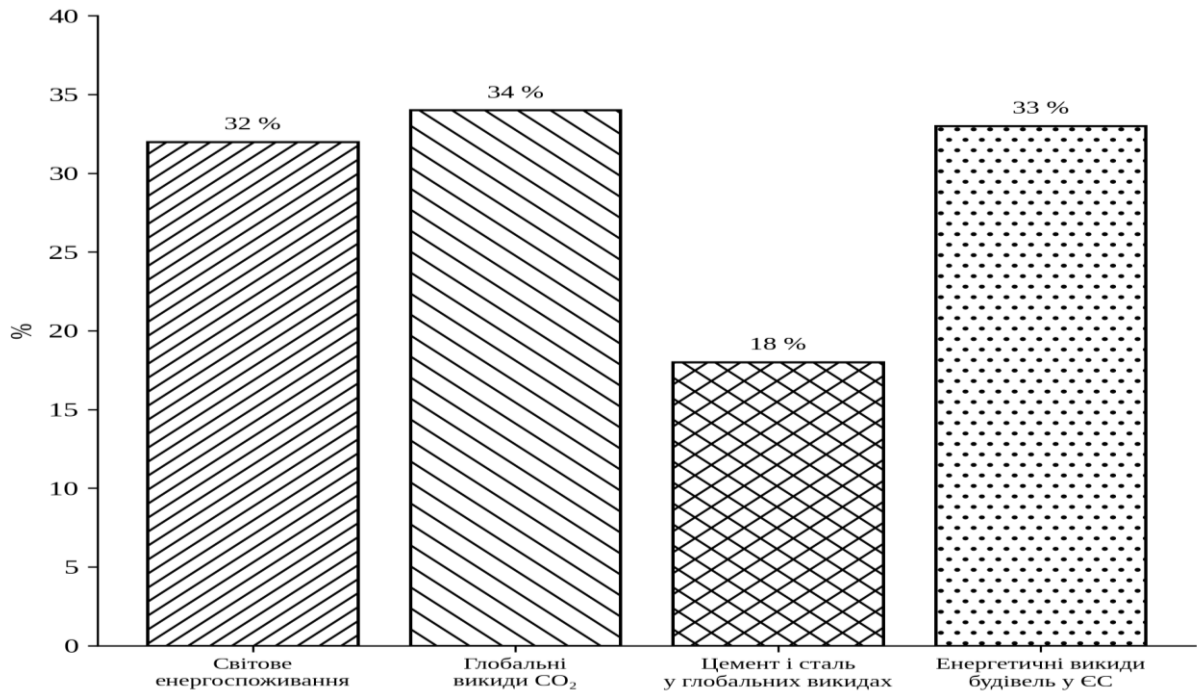


Рис. 3.2. Масштаб екологічного навантаження будівель і будівництва

Джерело: побудовано автором за [14, 177].

Рис. 3.2 підтверджує, що екологічна параметризація має охоплювати принаймні енергію, операційні викиди, втілений вуглець і матеріальні потоки. Відсутність будь-якого з цих блоків створює ризик часткової оптимізації, коли зниження одного виду навантаження супроводжується перенесенням впливу на іншу фазу життєвого циклу.

Матеріальний контур розкриває структура утворення відходів, наведена на рисунку 3.3. У 2022 році в ЄС було утворено 2 233 млн тонн відходів, з яких 38,4 % припадало на будівництво [178]. Визначено будівництво як домінуюче джерело маси відходів у ЄС. Управлінська директива повинна тому фіксувати не лише обсяг відходів, а їх походження, клас, маршрут, придатність до повторного використання та якість відновлення.

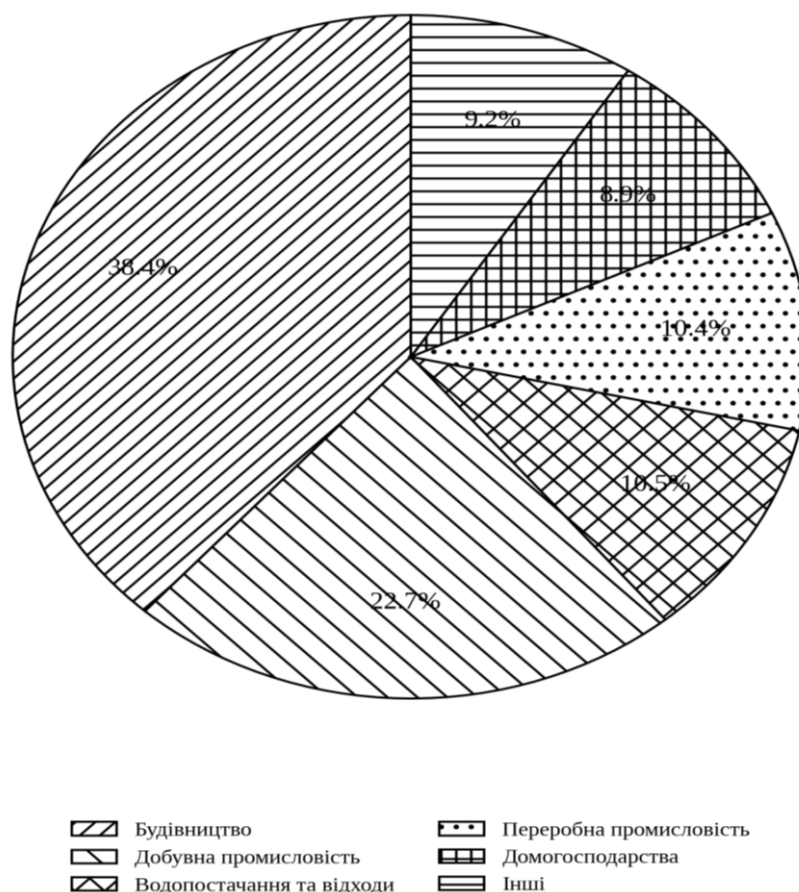


Рис. 3.3. Структура утворення відходів у ЄС за видами діяльності у 2022 році

Джерело: побудовано автором за [178].

Окремим критичним обмеженням є поводження з небезпечними відходами. Їх обсяг у ЄС зріс з 90,8 млн тонн у 2010 році до 119,0 млн тонн у 2022 році, або на 31,1 % [178], що підтверджує доцільність некомпенсаційного порога для небезпечних матеріалів і відходів. Неповнота попереднього обстеження, відсутність цифрового реєстру або непідтверджений маршрут передачі повинні переводити проєкт у статус критичної невідповідності незалежно від загального рівня економічної результативності.

Перетворення екологічної статистики на управлінські директиви систематизовано в таблиці 3.3. Вона пов'язує спостережуваний вплив із даними, ризиком і рішенням, що забезпечує перехід від галузевого аргументу до регламенту підприємства та показує, що екологічний показник стає елементом управління після встановлення цільової або граничної директиви, джерела фактичних даних і визначеного рішення.

Операціоналізація екологічних імперативів у проєктних ESG-директивах

Імператив	Параметрична директива	Фактичні дані	Управлінський наслідок
Операційна декарбонізація	Цільове EUI та граничні операційні викиди	Енергомодельовання, лічильники, BMS	Коригування оболонки, систем або режиму експлуатації
Втілений вуглець	Вуглецевий бюджет GWP за модулями життєвого циклу	BIM-обсяги, EPD, LCA	Заміна матеріалу, постачальника або конструктивного рішення
Циркулярність	Мінімальна частка повторно використаних ресурсів і вимоги до розбірності	Матеріальні паспорти, акти постачання, as-built модель	Перегляд специфікації та контрактних умов
Будівельні відходи	Ліміти утворення, сортування і високоякісного відновлення	Журнали відходів, вагові дані, маршрутні документи	Коригування технології, логістики та відповідальності підрядника
Небезпечні відходи	Обов'язкове обстеження та нульова толерантність до непідтвердженого поводження	Реєстр матеріалів, лабораторні висновки, документи передачі	Зупинення робіт, спеціалізований виконавець, резерв строків і витрат

Джерело: розроблено автором

Соціальна складова ESG у будівництві безпосередньо пов'язана з виробничою технологією, організацією мобільних робочих місць і багаторівневим ланцюгом підрядників. У 2023 році будівництво мало найвищий серед 21 виду економічної діяльності рівень нещасних випадків у ЄС – 2 899 на 100 тис. зайнятих, тоді як середній показник становив 1 393 [179].

Висока частота травматизму вимагає включення соціальних директив у календарно-ресурсне планування, процедури допуску підрядників, контроль умов на майданчику, цифрову фіксацію інцидентів і повторну перевірку коригувальних заходів. Кількість інструктажів сама по собі не доводить безпечність, якщо не підтверджено фактичний стан робочого середовища.

Профіль причин і обставин нещасних випадків наведено на рисунку 3.4. У 2023 році будівництво сформувало 24,0 % смертельних і 12,9 % нещасних випадків у ЄС; значна частка подій відбулася на мобільних робочих місцях і безпосередньо на будівельних майданчиках [179–180].

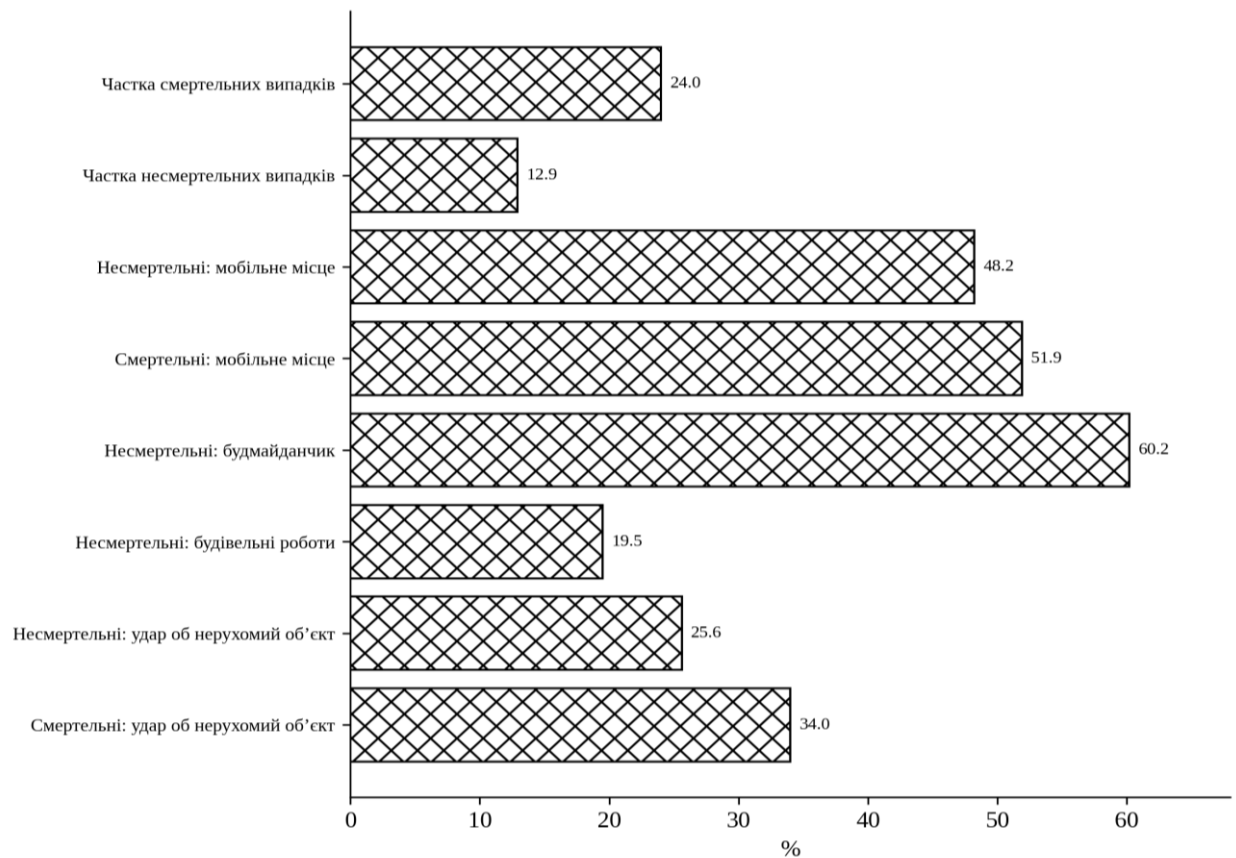


Рис. 3.4. Соціально-ризиковий профіль будівельної діяльності в ЄС у 2023 році

Джерело: побудовано автором за [179–180].

Виявлено розрив між формальною відповідальністю юридичної особи та фактичним місцем виникнення ризику. Соціальна директива має поширюватися на всіх виконавців і забезпечувати цифрово підтверджені процедури допуску, інструктажу, контролю засобів захисту, фіксації відхилень і реагування.

В табл. 3.4 конкретизовано механізм перетворення соціального ризику на керовану директиву. Запропонована структура відрізняє показники активності від показників контрольованого результату та формує соціальний контур причинної операціоналізації. Управління спрямовується не на накопичення звітної статистики, а на встановлення обов'язкового стану, підтвердження факту та запуск визначеної процедури реагування.

**Операціоналізація соціальних ESG-ризиків у цифровому контурі
будівельного проєкту**

Соціальний ризик	Параметрична директива	Джерело доказів	Коригувальне рішення
Недостатня підготовка персоналу	100 % допущених працівників мають актуальне навчання і підтвердження компетентності	Цифровий реєстр допусків, протоколи навчання	Обмеження доступу, повторне навчання, заміна виконавця
Небезпечне робоче середовище	Нульова толерантність до критичних порушень огорожень, маршрутів і робіт на висоті	Фотофіксація, чек-листи, BIM-модель організації майданчика	Зупинення операції, усунення порушення, повторна перевірка
Неповне охоплення субпідрядників	Однакові мінімальні вимоги для всіх рівнів ланцюга виконання	Контракти, реєстр підрядників, аудит майданчика	План коригувальних дій або припинення допуску
Повторюваність інцидентів	Гранична частота та обов'язковий аналіз першопричин	Журнал інцидентів, дані про near-miss, протоколи розслідування	Зміна технології, графіка, відповідального або системи мотивації
Скарги працівників і громад	Визначений строк реагування та заборона репресій	Реєстр звернень, анонімні канали, протоколи відповіді	Ескалація, незалежна перевірка, зміна процедури

Джерело: розроблено автором.

Зовнішня вимога набуває управлінської дієвості лише після її включення у внутрішню архітектуру врядування та цифрове середовище даних. Запропоновано розмежовувати зовнішній інституційний контур, внутрішній контур корпоративного врядування і цифровий контур управління даними. Їх узгодження є умовою переходу від формального комплаєнсу до керованої результативності.

Зовнішній контур установлює нормативні межі, технічні критерії, умови фінансування, очікування замовників і суспільну легітимність. Внутрішній контур визначає стратегію, повноваження органів управління, політики, ризик-апетит, стимули та процедури контролю. Цифровий контур описує

об'єкти даних, їх власників, джерела, формати, періодичність, якість, версійність, права доступу й аудитний слід.

У проєктній екосистемі цифровий контур має міжорганізаційний характер. Дані про будівельний продукт створює виробник, проєктувальник включає їх у BIM-модель, підрядник підтверджує фактичне постачання, аналітичний модуль використовує їх у LCA та LCC, а оператор підтримує актуальність упродовж експлуатації. Втрата ідентифікатора або версійності руйнує доказовість навіть за коректної методики розрахунку (рис. 3.5).

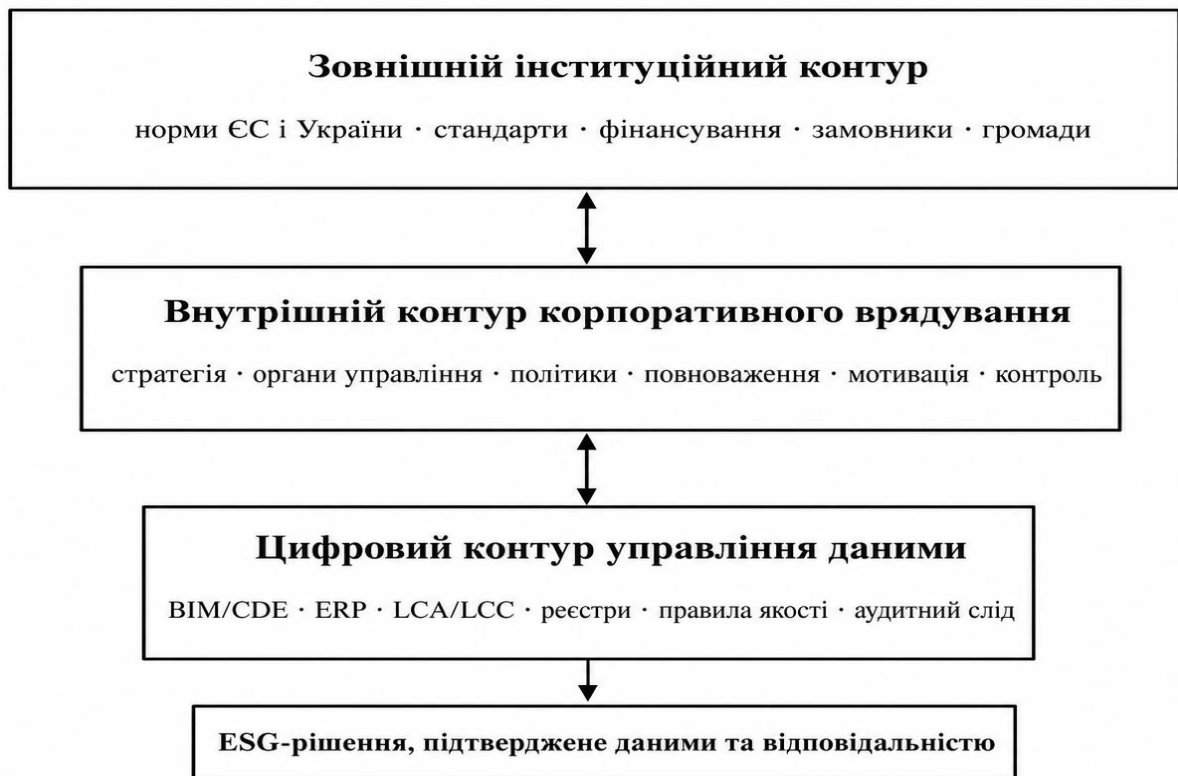


Рис. 3.5. Триконтурна модель інституціоналізації ESG-принципів у підприємствах-стейкхолдерах

Джерело: розроблено автором.

Рис. 3.5 показує, що домінування одного контуру формує специфічну деформацію. Зовнішня вимога без внутрішніх повноважень породжує формальну відповідність; корпоративна політика без даних залишається неперевірюваною; цифрова система без правил і наслідків створює технократичну цифровізацію. Результативність виникає лише за взаємного узгодження трьох контурів [278].

Розвиток інструментально-діагностичного та аналітично-інтерпретаційного контурів потребує переходу від загального ланцюга «вимога – правило – дані» до сценарно орієнтованої каузальної конструкції. Запропонована послідовність має вигляд: «вимога – параметрична директива – фактичні дані – ризик – управлінське рішення – верифікований результат». Кожна ланка виконує окрему методологічну функцію і створює формалізований артефакт для IDEM.

Параметрична директива визначається як формалізоване управлінське представлення вимоги у вигляді показника, цільового інтервалу, критичного порога, бінарної умови або лінгвістичного правила. На відміну від загальної політики, директива є придатною для нормування, нечіткої інтерпретації, сценарної зміни та автоматизованої перевірки. Вона встановлює, який стан є бажаним, допустимим, перехідним або критичним.

Фактичні дані не ототожнюються з числом. До їх паспорта входять значення, одиниця виміру, фаза життєвого циклу, джерело, власник, періодичність, дата актуальності, спосіб верифікації та коефіцієнт якості доказів. Ризик виникає як інтерпретована невідповідність між директивою і фактичним станом з урахуванням імовірності, наслідку та здатності до реагування.

Управлінське рішення може змінювати ресурс, технологію, партнера, графік, бюджет, контрактний поріг або правила збору даних. Верифікований результат підтверджує не лише виконання дії, а зміну параметра та зниження ризику. Порушення будь-якої ланки переводить ESG із режиму управління у режим декларативного звітування: вимога без директиви не вимірюється, директива без даних не перевіряється, дані без ризикової інтерпретації не визначають пріоритет, рішення без верифікації не доводить результат. Зворотний зв'язок повертає результат до директиви: за зміни нормативного середовища, технології або накопичених доказів пороги, функції належності та сценарні правила мають бути переглянуті.

Мапування тематичних стандартів ESRS на проєктні дані та функціональні результати управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва наведено в таблиці 3.5. Воно забезпечує змістову спадкоємність між зовнішньою звітністю і внутрішньою діагностикою.

Таблиця 3.5

Мапування тематичних стандартів ESRS на дані будівельного проєкту та компоненти IDEM

Тематичний блок	Проєктні дані	Основні власники	Інтерпретація
ESRS E1 «Зміна клімату»	Енергія, Scope 1–3, GWP матеріалів і будівлі, сценарії адаптації	Замовник, проєктувальник, постачальники, оператор	Критичний вуглецевий поріг
ESRS E2 «Забруднення»	Викиди забруднювачів, небезпечні речовини і відходи	Постачальник, підрядник, екологічна служба	Некомпенсаційна екологічна умова
ESRS E3 «Водні ресурси»	Водоспоживання будівництва й експлуатації, стоки, водний ризик	Підрядник, проєктувальник систем, оператор	Ресурсна ефективність
ESRS E4 «Біорізноманіття»	Місце розташування, площа порушення, природоохоронні обмеження	Замовник, планувальник, органи влади	Біосферосумісна параметризація
ESRS E5 «Ресурси і циркулярність»	Матеріальні відомості, вторинна сировина, відходи, розбірність	Проєктувальник, закупівлі, підрядник, переробник	Ціркулярність та інноваційність
ESRS S1–S2	Зайнятість, навчання, інциденти, умови субпідрядників, скарги	HR, охорона праці, підрядники, комплаєнс	Соціальний критичний поріг
ESRS G1	Конфлікти інтересів, антикорупційні процедури, платежі, порушення	Органи управління, комплаєнс, закупівлі, аудит	Out2, Out4, Out5; якість врядування і даних

Джерело: систематизовано автором за [59].

Таблиця 3.5 дозволяє використовувати один доказовий масив для зовнішнього розкриття і внутрішнього управління. Відмова від дублювання даних зменшує транзакційні витрати, але потребує єдиних ідентифікаторів, правил версійності та розмежування відповідальності за формування, використання й перевірку показника.

Інституціоналізація ESG не відбувається автоматично після прийняття нормативного акта або впровадження цифрової платформи. Дослідження бар'єрів вказують на взаємозалежність нормативної невизначеності, дефіциту компетентностей, непорівнянності даних, слабкої підтримки керівництва та розриву стимулів [166–171]. У будівництві ці перешкоди посилюються різною цифровою зрілістю учасників і тимчасовістю проєктних зв'язків.

Запропоновано розрізняти нормативно-регуляторні, організаційно-управлінські, інформаційно-метричні, проєктно-екосистемні та стимулювальні бар'єри. Їх діагностика має передувати автоматизації, оскільки цифрова система здатна закріпити дисфункцію: непорівнянні показники перетворюються на несумісні цифрові поля, а розмитість повноважень – на формальний маршрут погодження без власника рішення. Відповідно, предметом первинної діагностики мають бути не лише технічні можливості цифрової інфраструктури, а й узгодженість регламентів, відповідальності, системи показників та економічних стимулів між учасниками проєкту. Такий підхід дає змогу локалізувати джерело дисфункції до її перенесення у цифрове середовище та визначити адекватний інструмент інституційного коригування. Це створює підстави розглядати цифровізацію не як автономний засіб усунення ESG-бар'єрів, а як механізм операціоналізації попередньо узгоджених правил, даних і управлінських повноважень.

Причинно-наслідковий зв'язок між бар'єрами, цифровими дисфункціями і коригувальними діями наведено в таблиці 3.6. Вона показує, що коригування повинно відповідати природі бар'єра. Технологічна модернізація не усуває нормативну неоднозначність або конфлікт стимулів, водночас нова політика не вирішує проблему неповних і непростежуваних даних.

Рівень зрілості доцільно визначати за здатністю підприємства трансформувати зовнішні та внутрішні вимоги у формалізовані управлінські рішення й підтверджувати їх результативність достовірними та простежуваними даними, а не за кількістю впроваджених цифрових модулів.

За такого трактування цифрова зрілість виступає не самостійною ознакою інституціоналізації ESG-принципів, а засобом забезпечення безперервного зв'язку між вимогою, відповідальністю, фактичним станом, відхиленням і коригувальною дією

Таблиця 3.6

Інституційні бар'єри ESG-орієнтованого управління та напрями їх коригування

Група бар'єрів	Типовий прояв	Дисфункція моделі	Інституційне коригування
Нормативно-регуляторні	Різні рамки, показники і вимоги фінансування	Метрична фрагментація та дублювання звітності	Єдиний каталог вимог і мапування на параметричні директиви
Організаційно-управлінські	Нечіткі повноваження, опір змінам, слабка підтримка керівництва	Відсутність власника реагування та коригувальних дій	Матриця ролей, ескалація, зв'язок КРІ з мотивацією
Інформаційно-метричні	Неповнота, несумісність, слабка простежуваність	Цифрова вітрина без управлінської придатності	Паспорт даних, правила якості, верифікація, аудиторський слід
Проектно-екосистемні	Різні системи учасників і конфлікт інтересів	Розрив між корпоративними та проектними контурами	Спільні вимоги до даних, контракти і міжорганізаційні шлюзи
Стимулювальні	Домінування короткострокової вартості і строків	Імітаційна відповідність і перенесення ризиків	LCC, ризикові резерви, контрактні наслідки, винагорода за результат

Джерело: розроблено автором.

. Перехід до вищого рівня зрілості характеризується послідовним скороченням розриву між формальним закріпленням ESG-вимог та їх фактичним впливом на бюджетування, закупівлі, вибір матеріалів і технологій, взаємодію з підрядниками та контроль проектних результатів. Відповідно, зрілість набуває процесно-інституційного змісту й відображає спроможність підприємства відтворювати зазначений управлінський цикл у різних проектах та міжорганізаційних взаємодіях [258]. Відповідні рівні та їх управлінські характеристики наведено в таблиці 3.7.

Рівні зрілості інституціоналізації ESG-принципів у підприємствах-стейкхолдерах

Рівень	Стан управління	Стан даних	Управлінський висновок
Фрагментарний	ESG сприймається як зовнішня звітність; відповідальність не закріплена	Ручний збір, неповні джерела, відсутність версійності	Високий ризик формальної відповідності
Базовий	Є політики, первинний перелік показників і відповідальних	Створено реєстр, але зв'язок із проєктними даними обмежений	Сформовано основу без стійкого впливу на рішення
Процедурний	Критерії включені у регламенти, закупівлі, контроль і ризики	Визначено правила збору, перевірки та оновлення	Виникає повторюваний зв'язок між відхиленням і дією
Інтегрований	Показники впливають на бюджет, матеріали, партнерів і коригування	Дані простежуються, частково автоматизовані та верифіковані	ESG стає компонентом економіко-цифрового управління
Екосистемний	Єдині правила поширені на замовників, підрядників, постачальників та інвесторів	Міжорганізаційний обмін, спільні ідентифікатори і колективна підзвітність	Керування впливами в межах життєвого циклу проєкту

Джерело: розроблено автором.

Таблиця 3.7 визначає траєкторію інституційного навчання. Підвищення зрілості означає не збільшення обсягу звітності, а скорочення розриву між нормативною вимогою, фактичними даними, ризиковою інтерпретацією, рішенням і верифікованим результатом.

Українське нормативне поле містить окремі складові ESG-архітектури: енергетичну сертифікацію будівель, оцінку впливу на довкілля, управління відходами, охорону праці, публічні закупівлі, фінансову й управлінську звітність та ЄДЕССБ [148; 152; 154; 156; 182–185]. Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 жовтня 2024 року № 1015-р схвалено Стратегію запровадження підприємствами звітності із сталого розвитку, що орієнтує на ESRS, цифрове подання та засвідчення [182]. Це формує нормативні передумови для поступового переходу від розрізненого екологічного, соціального та управлінського регулювання до узгодженішої моделі ESG-

орієнтованого корпоративного врядування. Водночас наявні інструменти переважно регулюють окремі об'єкти або процедури й недостатньо пов'язують їх із життєвим циклом будівельного активу та міжорганізаційною відповідальністю його учасників.

Основний дефіцит полягає не у повній відсутності норм, а в їх фрагментарності на рівні будівельного проєкту. Енергетичні сертифікати, дані про відходи, охорону праці, дозвільні документи, кошторис і фінансова звітність формуються різними суб'єктами та не утворюють єдиного життєвоциклового профілю активу. Відсутність наскрізного ідентифікатора ускладнює доведення зв'язку між проєктним рішенням, фактичним виконанням, експлуатаційним результатом і розкритою ESG-інформацією. Унаслідок цього одна й та сама характеристика об'єкта може фіксуватися у різних інформаційних середовищах за відмінними правилами, що підвищує ризик дублювання, втрати простежуваності та суперечності даних. Для підприємства-стейкхолдера такий розрив означає необхідність формування єдиного контуру ідентифікації показників, їх власників, джерел, правил верифікації та управлінських наслідків відхилення.

Адаптація до європейської архітектури має випереджати формальний обов'язок звітування. Більшість українських будівельних підприємств може не відповідати новим порогам CSRD, однак братиме участь у ланцюгах європейських замовників, кредиторів і донорських програм. Конкурентоспроможність визначатиметься здатністю надати пропорційний, достовірний і цифрово сумісний набір даних. Тому пріоритетом інституційної адаптації має стати не механічне розширення переліку звітних показників, а забезпечення їх сумісності з проєктними рішеннями, контрактними вимогами, цифровими реєстрами та процедурами перевірки протягом життєвого циклу об'єкта. Відповідність національного інституційного поля потребам ESG-управління систематизовано в таблиці 3.8.

**Відповідність українського інституційного поля потребам ESG-
управління будівельними проєктами**

Національний інструмент	Сформований елемент	Методологічний розрив	Напрямок розвитку
Закон «Про енергетичну ефективність будівель»	Сертифікація та мінімальні енергетичні вимоги	Недостатня інтеграція операційного і втіленого вуглецю	Життєвоцикловий GWP та зв'язок із фактичними даними експлуатації
Закон «Про управління відходами»	Ієрархія управління, планування, відповідальність	Слабка простежуваність будівельних відходів і якості вторинних матеріалів	Матеріальні паспорти, цифровий маршрут і критерії високоякісного відновлення
Стратегія № 1015-р	Курс на ESRS, цифрове подання і засвідчення	Відсутній галузевий набір даних для будівництва	Будівельний словник даних і пропорційна вимога до ланцюга постачання
ЄДЕССБ	Цифрові дозвільні та об'єктні дані	Обмежений зв'язок із ESG-показниками та експлуатацією	Інтеграція енергії, матеріалів, GWP, відходів, ризиків і контролю
Публічні закупівлі	Можливість застосовувати екологічні характеристики і LCC	Домінування початкової ціни та нерівномірність практики	Типові зелені критерії, пороги та цифрове підтвердження
Охорона праці	Відповідальність роботодавця і базові процедури безпеки	Нерівномірне поширення контролю на субпідрядні ланцюги	Єдиний цифровий допуск, near-miss облік і контроль коригувальних дій

Джерело: систематизовано автором за [148; 154; 156; 182–184].

Визначено пріоритет інтеграції, що адаптація потребує єдиного словника показників, наскрізних ідентифікаторів об'єкта та продукції, правил якості даних і зв'язку невідповідності з фінансуванням, закупівлями та допуском учасника.

Для усунення фрагментарності розроблено дев'ятиетапний механізм інтеграції ESG-вимог. Його відмінність від традиційної підготовки нефінансового звіту полягає у початку процесу до формування показників. Спочатку ідентифікуються застосовні вимоги, визначається подвійна суттєвість і виконується мапування на фази життєвого циклу, об'єкти, процеси та учасників. Наступні етапи формують матрицю відповідальності, паспорти

показників, інформаційну інфраструктуру та правила інтеграції у відбір, бюджет, графік, закупівлі й контракти. Верифікація не завершує процес, а формує коригувальну дію та оновлює цифровий статус вимоги. Розкриття інформації повертає зворотний зв'язок від інвесторів, замовників, регуляторів і громад до нового циклу.

Механізм має рекурсивний характер. Зміна нормативного критерію, проєктного параметра, технології, учасника або якості даних запускає повторне проходження відповідних етапів. Така ітераційність забезпечує інституційну пам'ять економіко-цифрової моделі. Результати попередніх циклів при цьому не втрачаються, а накопичуються у вигляді верифікованих даних, зафіксованих відхилень, прийнятих рішень та оцінених наслідків їх реалізації. Це дає змогу зіставляти фактичні результати з установленими ESG-директивами та своєчасно виявляти повторювані або нові типи невідповідностей. Накопичений масив цифрових доказів стає підставою для уточнення цільових значень, критичних порогів, процедур контролю та розподілу відповідальності між підприємствами-стейкхолдерами. Рекурсивність також забезпечує адаптивність механізму до зміни інституційного середовища без необхідності повного перегляду сформованої архітектури управління. Унаслідок цього формується самокоригувальний контур ESG-управління, здатний підтримувати актуальність параметричних директив і управлінських рішень протягом життєвого циклу будівельного проєкту. Послідовне накопичення результатів окремих циклів створює основу для виявлення стійких причинно-наслідкових зв'язків між управлінськими впливами, зміною ESG-параметрів і фактичними результатами проєкту. На цій основі механізм набуває прогностичної властивості, оскільки дозволяє завчасно ідентифікувати ймовірні зони відхилень і коригувати управлінські рішення до виникнення критичних порушень. Послідовність механізму подано на рисунку 3.6.

Дослідження контурів оцінювання та впровадження ESG-принципів



Рис. 3.6. Інституційно-ітераційний механізм впровадження ESG-принципів відповідального врядування в економіко-цифрову модель управління будівельним підприємством

Джерело: розроблено автором.

Інституціоналізацію ESG-принципів обґрунтовано як процес перетворення зовнішніх екологічних, соціальних і управлінських вимог на відтворювані правила економіко-цифрового управління. Його структурну основу становить взаємодія зовнішнього інституційного, внутрішнього корпоративного та цифрового контурів. Розрив між ними формує відповідно формальний комплаєнс, декларативне корпоративне врядування або технократичну цифровізацію без зміни поведінки.

3.2. Архітектоніка алокації та управління ризиками підприємств-стейкхолдерів у цифрових екосистемах будівельних проєктів

Інституціоналізація ESG-принципів, обґрунтована у підрозділі 3.1, створює нормативну та інформаційну основу відповідального врядування, однак не визначає, яким чином ризикова відповідальність має бути розподілена між учасниками будівельної екосистеми. Вимога, показник і цифровий доказ набувають управлінської сили лише тоді, коли встановлено суб'єкта, здатного своєчасно виявити відхилення, прийняти рішення, виконати захід, профінансувати залишкові наслідки та забезпечити зовнішню комунікацію.

Ризикова природа будівельного проєкту формується на перетині матеріальних процесів, договірних зобов'язань, фінансових потоків, регуляторних вимог, екологічних обмежень, соціальних очікувань і даних [264]. Традиційне закріплення ризику за однією стороною договору не гарантує керованості, оскільки формальний носій наслідків може не мати доступу до первинного сигналу, повноважень впливати на джерело події або ресурсів для реагування.

Наукова проблема полягає у невідповідності статичної договірної логіки динамічній природі ризиків. У міру переходу від ініціації до проєктування, закупівель, будівництва, введення в експлуатацію та використання об'єкта змінюються джерела невизначеності, інформаційна перевага учасників,

економічні стимули й масштаб можливих втрат. Передача ризику без перевірки фактичної спроможності сторони управляти його першопричиною підвищує ціну договору, провокує опортуністичну поведінку та не зменшує сукупних втрат проєкту.

Завдання підрозділу полягає у розробленні механізму адаптивної алокації ризиків між підприємствами-стейкхолдерами, який поєднує інституційно-контрактний, економіко-діагностичний, цифрово-аналітичний та екосистемно-поведінковий рівні. Механізм має встановлювати критерії придатності учасників до виконання окремих ролей, забезпечувати цифрове закріплення відповідальності та передбачати її перегляд за зміни доказів, порогів і параметрів проєкту.

Методологічну основу становлять положення ISO 31000, стандартів управління проєктними ризиками, збалансованого контрактного розподілу та реляційного врядування [55; 84; 186–194]. У цифровій екосистемі вони доповнюються вимогами до походження даних, журналу рішень, кіберстійкості, інтероперабельності й автоматизованого раннього попередження [86; 155; 201–203].

Теоретико-методологічне розмежування управління, передачі та алокації ризику

Управління ризиками охоплює встановлення контексту, ідентифікацію, аналіз, оцінювання, вибір реагування, моніторинг і комунікацію. Алокація виконує окрему функцію: визначає, хто і на якій підставі здійснює кожну управлінську дію, кому належать первинні дані, хто має право ескалації та хто забезпечує ресурсне покриття залишкового ризику. За відсутності такого розмежування цифровий реєстр фіксує подію, але не запускає керованої реакції.

Передача ризику змінює суб'єкта договірної або фінансової відповідальності, проте не обов'язково передає контроль над джерелом події. Страхування компенсує частину збитку, але не усуває технічну колізію; гарантія захищає фінансовий інтерес, але не забезпечує якість первинних

даних; загальна умова договору не створює можливості впливати на регуляторне рішення. Алокація тому охоплює функціональну композицію прав, даних, дій, резервів і комунікації.

Біосферосумісний проєкт розширює горизонт ризикового управління. Вартість і строк мають оцінюватися разом із вуглецевим та матеріальним слідом, безпекою праці, соціальною легітимністю, якістю внутрішнього середовища, ресурсною циркулярністю та спроможністю активу зберігати функціональність протягом життєвого циклу. Ризик набуває подвійної прив'язки: до цілі управління та до цифрового сліду, що підтверджує зміну її досягнення.

Трансформацію природи ризиків у цифровій екосистемі систематизовано в таблиці 3.9. Вона показує, чому традиційне ототожнення ризику з окремим відхиленням вартості або строку є недостатнім для проєктів, де наслідки розподілені між організаціями та фазами життєвого циклу. У цифровому середовищі ризик набуває багатовимірної структури, оскільки його виникнення, ідентифікація, оцінювання та реагування можуть бути розподілені між різними суб'єктами проєктної екосистеми. Відповідно, ефективність управління визначається не лише точністю оцінки ймовірності та масштабу наслідків, а й узгодженістю повноважень, доступу до даних, ресурсного забезпечення та здатності учасників впливати на першопричину ризикової події. Така інтерпретація створює методологічні передумови для переходу від статичного закріплення ризику до його функціональної та динамічної алокації між підприємствами-стейкхолдерами. Підтверджено, що предметом адаптивної алокації є не абстрактний ризик, а набір функцій, необхідних для його попередження, виявлення, локалізації, фінансування та документування. Така конструкція дає змогу уникнути ситуації, коли договірна відповідальність існує без управлінської спроможності.

Методологічне розмежування способів поводження з ризиком наведено в таблиці 3.10. Розподіл функцій алокації не замінює уникнення, зниження, передачу або прийняття, а створює умови їх реального виконання.

Трансформація природи ризиків у цифровій екосистемі будівельного проекту

Вимір трансформації	Традиційне трактування	Зміна в цифровій екосистемі	Управлінський наслідок
Джерело виникнення	Технічні, фінансові та строкові відхилення	Поєднання технічних, екологічних, соціальних, цифрових, регуляторних і репутаційних подій	Багатовимірна карта ризиків, пов'язана з цілями та цифровими даними
Горизонт впливу	Окрема стадія проектування або виконання робіт	Увесь життєвий цикл об'єкта і ланцюг створення цінності	Оцінювання майбутніх економічних, екологічних і соціальних наслідків
Носій відповідальності	Сторона договору, якій передано ризик	Рольова композиція учасників із різним доступом до даних, впливом і ресурсами	Розмежування власника даних, реагування, виконавця, резерву та комунікації
Інформаційна база	Експертні оцінки, припущення, статичний реєстр	CDE, BIM, ERP, KRI, журнали подій, дані постачальників і датчиків	Вимоги до якості, простежуваності та незалежної верифікації
Механізм реагування	Претензійна процедура після події	Раннє попередження, сценарне оцінювання, порогова ескалація і перерозподіл	Перевага превентивного управління та скорочення сукупних втрат

Джерело: сформовано автором на основі [55; 84; 86; 186–194].

Таблиця 3.10 формує базове положення механізму: передача наслідків без алокації функцій не усуває ризикового розриву. Економічно обґрунтованим є розподіл, за якого кожна функція закріплена за суб'єктом із найкращою комбінацією контролю, даних, компетентностей, стимулів і ресурсів. Такий принцип зміщує акцент із формальної належності ризику на фактичну спроможність підприємства-стейкхолдера управляти його джерелом і наслідками. Водночас функціональне розмежування відповідальності створює підґрунтя для подальшого визначення критеріїв придатності учасників, рольової конфігурації та умов динамічної перерозподілу ризику протягом життєвого циклу проекту.

Методологічне розмежування способів поводження з ризиком

Засоби	Предмет управлінського впливу	Основне рішення	Методичне обмеження
Уникнення	Джерело ризику або проєктна альтернатива	Відмова, заміна технології, місця, обсягу або конфігурації	Може зменшувати очікуваний ефект чи звужувати альтернативи
Зниження	Імовірність і масштаб наслідків	Превентивні та коригувальні заходи	Потребує виконавця, доказів, строку і фінансування
Передача	Фінансові або договірні наслідки	Страховання, гарантія, контрактне покладання	Не передає фактичний контроль над першопричиною
Прийняття	Залишковий ризик	Формування резерву і меж толерантності	Без резерву перетворюється на пасивне ігнорування
Алокація	Сукупність управлінських функцій щодо конкретного ризику	Розподіл ролей, повноважень, даних, стимулів і резервів	Потребує перегляду за зміни фази, доказів або порогів

Джерело: сформовано автором з урахуванням [186–194].

Багатовимірна таксономія ризиків та інформаційна визначеність

Перелікова класифікація ризиків часто дублює одну подію в кількох групах. Зростання вартості може одночасно трактуватися як фінансовий, ринковий, проєктний і контрактний ризик, хоча джерело, наслідок і форма відповідальності є різними аналітичними ознаками. Для усунення дублювання ризик доцільно позиціонувати у просторі джерела, наслідку, фази життєвого циклу та інформаційного стану.

Багатовимірне представлення формалізовано як декартовий добуток чотирьох множин:

$$\Omega^R = S \times C \times L \times D, \quad (3.1)$$

де S – джерело ризику; C – вектор наслідків; L – фаза життєвого циклу; D – стан інформаційного забезпечення. Перехресні впливи фіксуються матрицею «джерело – наслідок», а кожному елементу простору відповідають індикатори, пороги, джерела даних і правила зміни ролей.

Структуру таксономії наведено в таблиці 3.11. Її інформаційний вимір має самостійне значення, оскільки однакова фізична подія потребує різного рішення за верифікованих, неповних або суперечливих даних.

Таблиця 3.11

Багатовимірна таксономія ризиків цифрової екосистеми будівельного проекту

Вимір	Групи	Приклади даних для ідентифікації	Управлінська функція
Джерело	Безпекові; регуляторні; ринкові; технічні; ресурсні; цифрові; екологічні; соціальні	повідомлення про події, ціни, норми, ВІМ-колізії, журнали постачання, кіберінциденти	Встановити причинний механізм і суб'єкта, здатного впливати на нього
Наслідок	Вартість; строк; якість; безпека; довкілля; безперервність; репутація; суспільна цінність	кошторис, графік, контроль якості, викиди, аварійність, скарги, доступність сервісів	Оцінити масштаб, взаємозалежність і прийнятний рівень втрат
Життєвий цикл	Ініціація; обґрунтування; проектування; закупівля; будівництво; введення; експлуатація; повторне використання	рішення контрольних точок, статус документації, контрактні події, акти виконання	Визначити часову придатність ролей і момент їх перегляду
Інформаційний стан	Повнота; актуальність; точність; сумісність; простежуваність; доступність; захищеність	метадані, журнали змін, валідація, права доступу, резервне копіювання	Встановити довіру до оцінки й межу автоматизації рішення

Джерело: розроблено автором.

Таблиця 3.11 переводить ризикову подію у формалізований об'єкт цифрового управління. Відокремлення джерела від наслідку запобігає помилковому покладанню відповідальності на суб'єкта, який лише стикається зі збитком, але не контролює його причинний механізм.

Емпірична перевірка механізму потребує врахування масштабу відновлення України. За п'ятьма раундами RDNA пряма шкода зросла з 97,4 до 195,1 млрд дол. США, економічні та соціальні втрати – з 252,0 до 666,7 млрд дол. США, а потреби у відновленні – з 348,5 до 587,7 млрд дол. США [198]. Динаміку трьох показників подано на рисунку 3.7.

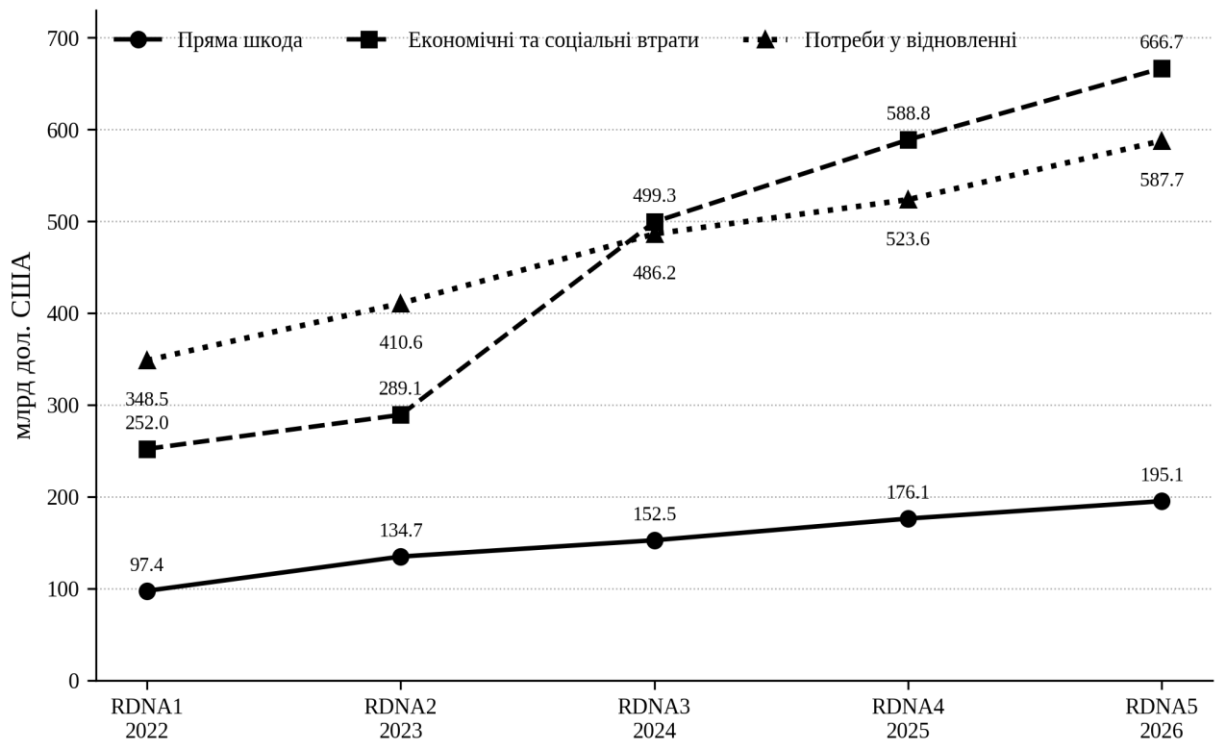


Рис. 3.7. Динаміка оцінок прямої шкоди, втрат і потреб у відновленні

України за RDNA1–RDNA5

Джерело: побудовано автором за [198].

Засвідчено випереджальне зростання втрат порівняно з прямою шкодою. Ризик проєкту відновлення тому охоплює не лише відновлювальну вартість активу, а часову ціну недоступності послуг, втрату доходів, каскадні наслідки та ризик недосягнення функціонального результату.

Секторальна структура потреб формує портфельний ризик концентрації. Найбільші потреби припадають на транспорт, енергетику, житло, торгівлю і промисловість та сільське господарство. Порівняння секторів наведено на рисунку 3.8. Виявлена висока частка взаємозалежних інфраструктурних систем. Локальне виконання окремого контракту не гарантує функціонального результату, якщо не завершено суміжні енергетичні, транспортні або комунальні проєкти. Власник портфельного ризику має тому залишатися на рівні, здатному координувати міжсекторальну черговість і резерви.

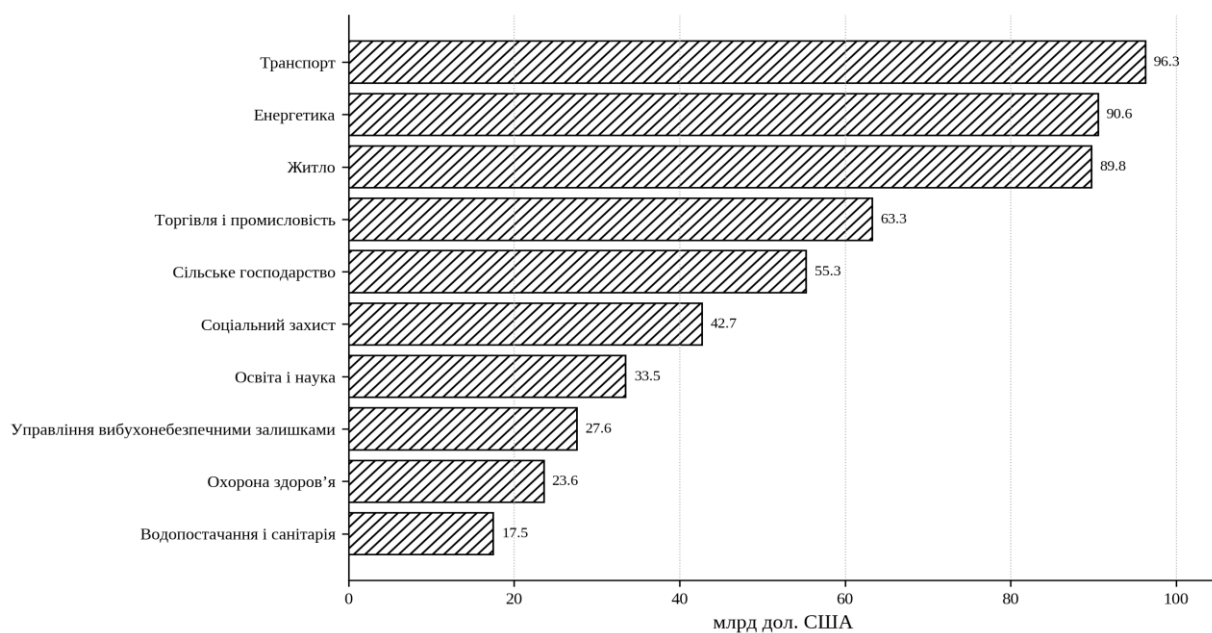


Рис. 3.8. Найбільші секторальні потреби у відновленні України станом на 31 грудня 2025 року

Джерело: побудовано автором за [198].

Просторовий розподіл потреб демонструє концентрацію ризикового навантаження у прифронтових регіонах і великих агломераціях. Регіони з найбільшими потребами наведено на рисунку 3.9.

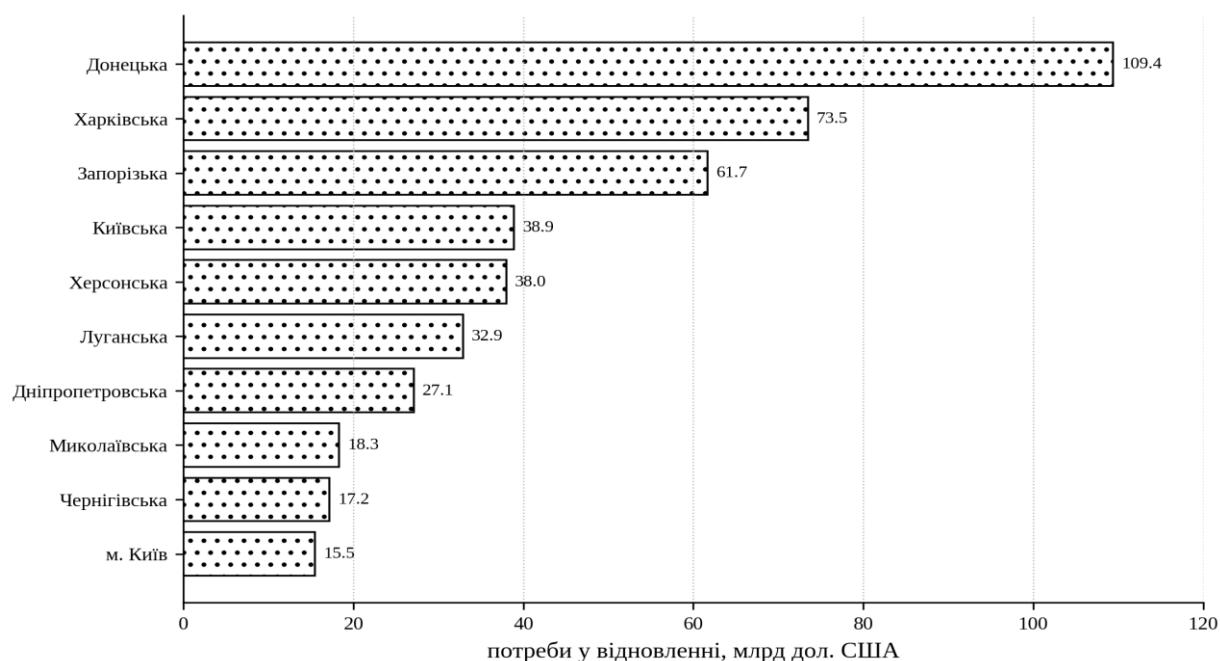


Рис. 3.9. Регіони з найбільшими потребами у відновленні станом на 31 грудня 2025 року

Джерело: побудовано автором за [198].

Рис. 3.9 обґрунтовує диференціацію контрактних і страхових умов за територіальним ризиковим профілем. Безпекові обмеження, повторне пошкодження, логістика, доступ до робочої сили та збереження даних не можуть бути безумовно перенесені на локального підрядника, якщо їх джерела перебувають поза сферою його контролю.

Фінансова забезпеченість і портфельна готовність як детермінанти алокації

Ризик фінансування має двоїсту природу: дефіцит загального ресурсу та невідповідність календаря фінансування технологічному графіку. За пріоритетами 2026 року потреба становила 15,245 млрд дол. США, тоді як підтверджене фінансування – 5,765 млрд дол. США, або 37,8 % [198]. Співвідношення потреб, фінансування та дефіциту наведено на рисунку 3.10.

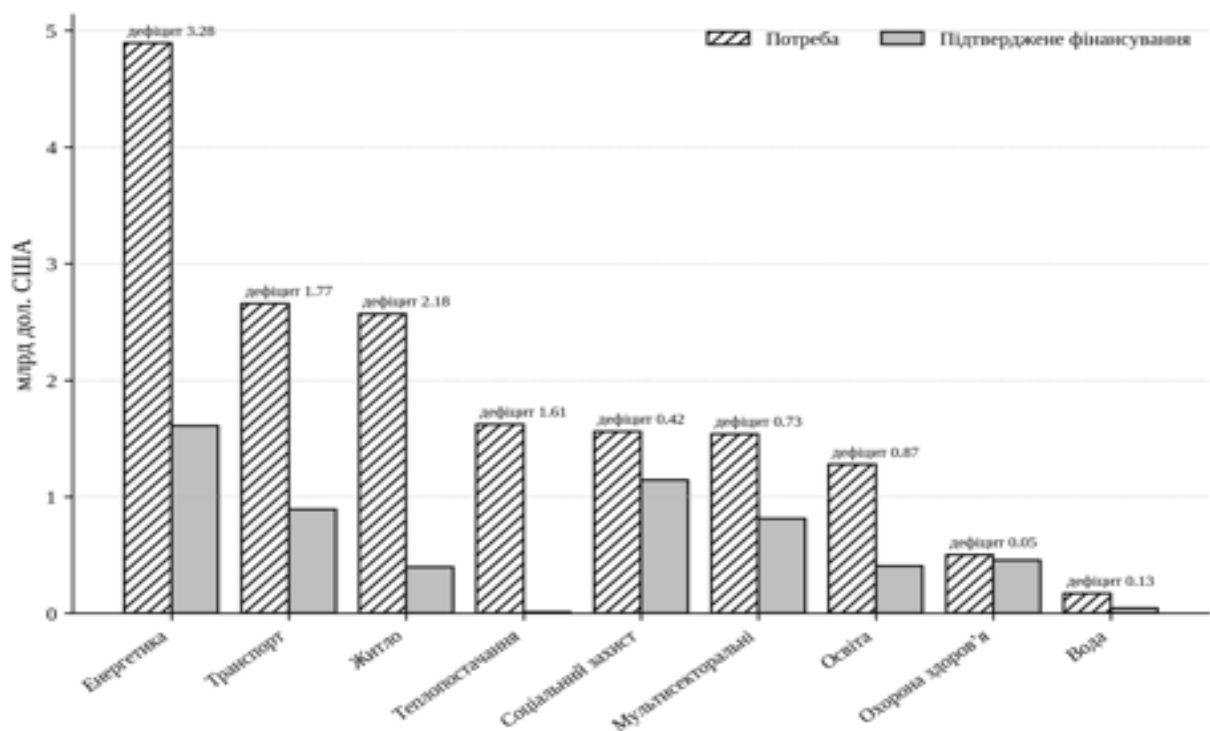


Рис. 3.10. Потреби, підтверджене фінансування та дефіцит за пріоритетними напрямками відновлення у 2026 році

Джерело: розраховано і побудовано автором за [198].

Рис. 3.10 показує, що профіль фінансового ризику визначається не лише абсолютним дефіцитом, а поєднанням частки покриття, соціальної

критичності функції та готовності проєкту. Низьке покриття теплопостачання або житла потребує фінансового гаранта і резерву безперервності, тоді як високе покриття охорони здоров'я зміщує увагу на спроможність реалізації.

Аналітичну інтерпретацію сигналів фінансово-портфельного ризику наведено в таблиці 3.12. Вона конкретизує, які функції мають бути розподілені між портфельним органом, замовником, власником календаря, верифікатором готовності та носієм резерву.

Таблиця 3.12

Фінансово-портфельні ризики відновлення

Сигнал	Імовірний причинний механізм	Ризиковий наслідок	Необхідна алокація
Покриття потреб нижче 40 %	обмеження бюджету, непідтверджене партнерське фінансування, низька банківська готовність	зупинка або дроблення проєкту; незавершене будівництво	портфельний власник фінансування; замовник графіка; носій резерву ліквідності
Фінансування наприкінці бюджетного періоду	затримка рішень і розподілу асигнувань	неможливість освоєння коштів без порушення якості та процедур	орган бюджетного рішення; власник календаря; незалежний контроль готовності
Велика кількість непідготовлених ініціатив	відсутність єдиних критеріїв готовності та документації	витіснення зрілих проєктів; перегляд кошторису; втрата часу	власник портфеля; технічний верифікатор; власник даних про готовність
Концентрація ресурсів у великих програмах	агрегація ініціатив і залежність від центрального управління	системний масштаб наслідків управлінської помилки	програмний офіс; незалежний контроль; резерв сценарного перерозподілу
Низьке покриття критичної послуги	невідповідність ресурсів соціальній критичності	порушення безперервності та зростання соціальних втрат	власник пріоритету; фінансовий гарант; суб'єкт зовнішньої комунікації
Сигнал	Імовірний причинний механізм	Ризиковий наслідок	Необхідна алокація
Покриття потреб нижче 40 %	обмеження бюджету, непідтверджене партнерське фінансування, низька банківська готовність	зупинка або дроблення проєкту; незавершене будівництво	портфельний власник фінансування; замовник графіка; носій резерву ліквідності

Джерело: сформовано автором за результатами аналізу [198].

Таблиця 3.12 доводить, що фінансовий ризик не може бути закріплений лише за виконавцем робіт. Розподіл має охоплювати бюджетне рішення,

технологічний графік, підтвердження готовності та ресурсне покриття, інакше договірна передача створює незабезпечене зобов'язання.

Макрорівнева потреба у відновленні не тотожна фактичній спроможності підприємств виконувати портфель проєктів. Щомісячні опитування НБУ демонструють зміну індексу очікувань ділової активності будівництва від 37,9 у січні до значень понад 54 у травні–липні 2025 року [199]. Зафіксована висока чутливість будівельних підприємств до сезонності, фінансування, безпекової ситуації, енергопостачання та доступності ресурсів. Оцінювання контрагента лише за річною фінансовою звітністю не відображає оперативної зміни спроможності; необхідні динамічні KRI замовлень, ресурсів, кадрів і цінового тиску. Профіль операційних очікувань наведено на рис. 3.11.

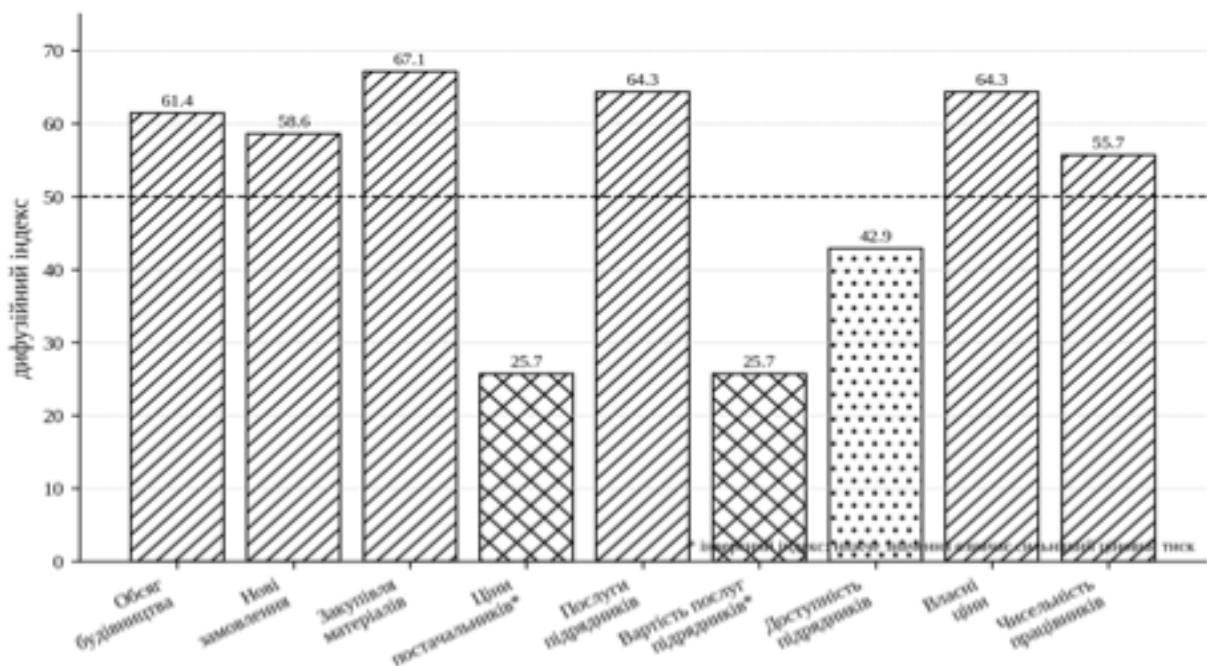


Рис. 3.11 – Профіль операційних очікувань і ризикового тиску підприємств будівництва

Джерело: побудовано автором за [199].

Обґрунтована роздільна алокація цінового, ресурсного та календарного ризиків. Постачальник володіє первинними даними про ціну й доступність, проєктувальник визначає можливість заміни, підрядник організовує закупівлю, замовник погоджує зміну, а фінансова сторона формує резерв.

Концентрація цих функцій у підрядника створює конфлікт стимулів і спірність компенсації.

Наслідки неузгодженого розподілу повноважень виявлено аудитом експериментального проєкту комплексного відновлення шести населених пунктів. Із 6981 пошкодженого або зруйнованого об'єкта до відновлення було включено 595, або 8,5 %, причому частка коливалася від 0 % до 65,2 % [200].

Виявлені аудитом недоліки перетворено на вимоги до механізму алокації в таблиці 3.13. Такий перехід дає змогу трактувати аудиторські зауваження не як ізольовані порушення, а як прояви незаповнених або конфліктних ролей.

Таблиця 3.13

Трансформація виявлених аудитом недоліків у вимоги до системи алокації ризиків

Недолік	Причина ризику	Відсутня або розмита роль	Необхідний цифровий контроль
Неузгодженість регулювання та повноважень	відсутність єдиного центру рішення і правил ескалації	власник реагування; суб'єкт зовнішньої комунікації	реєстр повноважень, маршрут погодження, строк і журнал ескалації
Відбір неготових об'єктів	неверифіковані документи та нечіткі критерії пріоритетності	власник даних; незалежний верифікатор	цифровий шлюз готовності; заборона переходу без повного пакета доказів
Розподіл коштів наприкінці періоду	розрив бюджетного і технологічного календарів	власник фінансового рішення; власник реагування	зв'язаний графік фінансування і виконання; сигнал критичної дати
Завищення обсягів і вартості	конфлікт стимулів та слабкий технічний контроль	виконавець контролю; власник фактичних даних	ВІМ-відомості, геоприв'язані докази, журнал змін, подвійна верифікація
Неповна звітність	відсутність уніфікованих показників і відповідальності за якість	власник даних; власник реагування на відхилення	єдина модель даних, контроль повноти, простежуваність джерела
Закупівлі поза електронною системою	знижена прозорість і конкуренція	власник процедури; суб'єкт зовнішньої комунікації	обґрунтування винятку, публічний слід, індикатор концентрації

Джерело: сформовано автором за [200].

Підтверджено, що цифровий контроль має бути прив'язаний до конкретної ролі та рішення. Автоматизація без власника даних або маршруту ескалації лише пришвидшує відтворення недостовірної інформації та не усуває управлінської безвідповідальності.

Систематичне недооцінювання інфраструктурних проєктів не обмежується українським контекстом. У дослідженні 258 транспортних проєктів фактичні витрати перевищували первісні оцінки у 86 % випадків; середнє перевищення становило 20,4 % для автомобільних доріг, 33,8 % для мостів і тунелів та 44,7 % для залізничних проєктів [197]. Порівняння наведено на рис. 3.12.

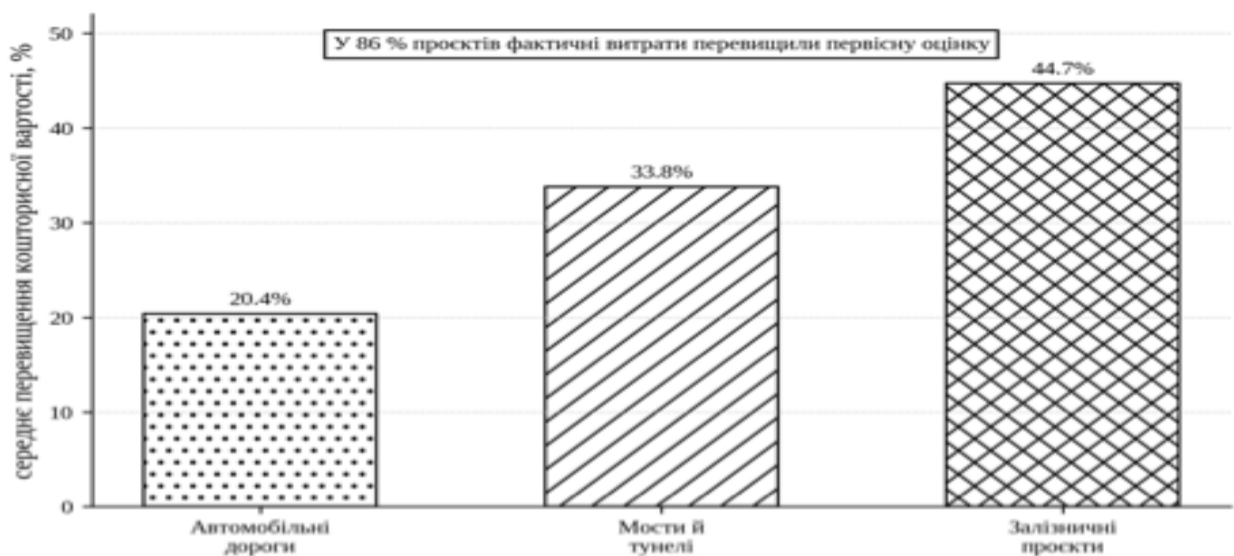


Рис. 3.12. Міжнародні оцінки середнього перевищення вартості транспортних інфраструктурних проєктів

Джерело: побудовано автором за [197].

Рис. 3.12 підтверджує структурний характер кошторисного ризику. Його алокація має розмежовувати автора базової оцінки, незалежного верифікатора, власника рішення щодо обсягу, суб'єкта управління змінами та носія резерву. Покладання всього перевищення на підрядника після укладення договору стимулює премію за ризик або приховане зниження якості.

Запропонований механізм поєднує чотири методологічні рівні, які діють одночасно на портфельному, проєктно-міжорганізаційному та корпоративно-операційному масштабах. Інституційно-контрактний рівень визначає правові

межі, договірні зобов'язання, страхування, гарантії та процедури ескалації. Економіко-діагностичний рівень оцінює сценарії втрат, вартість контролю, фінансову спроможність і резерви. Цифрово-аналітичний рівень забезпечує джерела даних, KRI, пороги, верифікацію і цифровий слід. Екосистемно-поведінковий рівень враховує інтереси, довіру, соціальну легітимність, мотивацію та фактичну поведінку учасників.

Справедлива алокація не означає рівномірного розподілу ризику. Кожна роль має закріплюватися за суб'єктом, який володіє найкращою комбінацією контрольованості джерела, доступу до даних, спроможності мінімізувати наслідки, правової визначеності, економічної мотивації, життєвоциклового впливу, соціальної легітимності та цифрової перевірюваності.

Придатність стейкхолдера j до виконання ролі r щодо ризику i на фазі 1 може бути подана як зважена оцінка восьми критеріїв із коригуванням на конфлікт інтересів, відсутність компетентності або перевищення ліміту відповідальності:

$$A_{ijr}^1 = \sum_{k=1}^8 w_{kr} \cdot z_{ijk}^1 - P_{ijr}^1, \quad \sum w_{kr} = 1, \quad (3.2)$$

де z_{ijk}^1 – нормоване значення k -го критерію; w_{kr} – вага критерію для визначеної ролі; P_{ijr}^1 – штраф за конфлікт інтересів, відсутність повноважень, компетентності або фінансового ліміту. Ваги встановлюються окремо для ролей, тому володіння даними не ототожнюється з правом прийняти рішення чи обов'язком фінансувати наслідки.

Зміст критеріїв і ризику їх помилкового застосування систематизовано у таблиці 3.14. Кожний критерій повинен підтверджуватися конкретним цифровим або документальним доказом. Замінюється принцип «ризик несе сторона договору» принципом «роль виконує сторона з доказово підтвердженою здатністю». За відсутності одного суб'єкта, придатного до всіх функцій, ризик розподіляється між кількома ролями з незалежною перевіркою конфліктів інтересів.

Критерії адаптивної алокації ризиків між підприємствами-стейкхолдерами

Критерій	Інформаційно-доказова база оцінювання критерію	Ризик методологічно некоректної інтерпретації критерію
Контрольованість джерела ризику	право змінити технологію, специфікацію, графік або спосіб виконання	покладання ризику на сторону, що лише виконує рішення іншого учасника
Доступ до даних	первинний датчик, ВІМ-модель, журнал постачання, авторський нагляд	формальна відповідальність без можливості своєчасного виявлення
Спроможність мінімізувати наслідки	сертифікований персонал, план реагування, резервні потужності	відповідальність без реального інструментарію
Правова визначеність	договір, технічне завдання, регламент, маршрут ескалації	спори через нечіткість обов'язків і умов зміни
Економічна мотивація	розділення ініціатора, верифікатора і платника; gain/pain share	моральний ризик та стратегічне викривлення оцінки
Життєвоцикловий вплив	LCC, LCA, паспорт активу, план технічного обслуговування	локальна економія з довгостроковими втратами
Соціальна легітимність	протоколи консультацій, механізм скарг, публічне обґрунтування	формально законне рішення, що втрачає суспільну підтримку
Цифрова перевірюваність	часова мітка, підпис, журнал версій, геоприв'язаний доказ	автоматизація недостовірних або неповних даних

Джерело: розроблено автором з урахуванням [186–194].

Предмет відповідальності та мінімальний цифровий доказ для кожної ролі наведено у таблиці 3.15. Розмежування доповнює традиційні матриці RACI функціями володіння даними і фінансового покриття. Усуваються «порожні ролі», за яких ризик формально має власника, але не має джерела доказів, виконавця або фінансового покриття. Такий підхід забезпечує однозначну ідентифікацію суб'єктів, відповідальних не лише за реагування на ризикову подію, а й за формування, актуалізацію та верифікацію цифрових доказів щодо її стану і наслідків. Водночас поєднання функціональної відповідальності з інформаційним та ресурсним забезпеченням створює передумови для простежуваності управлінських рішень упродовж життєвого циклу проєкту. Повний рольовий вектор стає обов'язковою умовою переходу від оцінювання до управлінської дії.

Таблиця 3.15

Функціональні ролі у контурі адаптивного управління ризиком

Роль	Предмет відповідальності	Мінімальний цифровий доказ	Типові суб'єкти
Власник даних	походження, повнота, актуальність, права доступу та збереження інформації	реєстр джерел, метадані, журнал версій і валідації	проектувальник; підрядник; оператор платформи; постачальник; оператор активу
Власник реагування	вибір способу дії, строк рішення, межі ескалації	протокол рішення, електронне погодження, посилення на KRI	замовник; керівник проекту; власник процесу; програмний офіс
Виконавець заходу	фактична реалізація превентивної або коригувальної дії	завдання, акт, фото- або модельний доказ, контрольний результат	підрядник; проектувальник; постачальник; спеціалізована служба
Носій резерву	фінансове покриття залишкових наслідків у затверджених межах	бюджетний резерв, страховий поліс, гарантія, підтвердження виплати	замовник; підрядник; страховик; фінансова установа; фонд
Суб'єкт зовнішньої комунікації	своєчасне узгоджене повідомлення регуляторів, громад, партнерів та інвесторів	реєстр повідомлень, адресати, дата, підтвердження отримання	замовник; орган влади; оператор; уповноважений комунікаційний центр

Джерело: розроблено автором.

Початкова алокація, зафіксована у договорі, є базовою конфігурацією, а не незмінним станом. На фазі ініціації домінують ризики обґрунтованості потреби, пріоритету і фінансової перспективи; у проектуванні – неповнота вихідних даних, колізії, LCC та ESG-вимоги; у закупівлі – конкуренція, спроможність контрагента і простежуваність; у будівництві – строк, безпека, якість і ресурси; в експлуатації – надійність, енерговитрати та технічне обслуговування.

Переалокцію запускає верифікований тригер: перехід до наступної фази; порушення порогового KRI; зміна обсягу, технології, функціональної вимоги або контрагента; зміна джерела фінансування; безпекова чи регуляторна подія; погіршення якості або доступності даних. Після спрацювання тригера критерії придатності оцінюються повторно, а рішення

про збереження або зміну ролей документується (рис. 3.13). Цифровий слід дозволяє встановити момент зміни обставин, суб'єкта, який володів інформацією, та своєчасність ескалації.

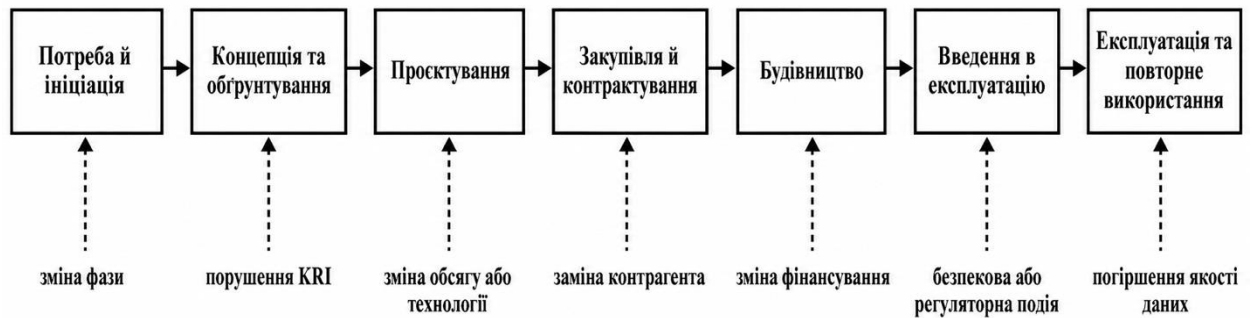


Рис. 3.13. Динамічна перерозподіл ризиків за фазами життєвого циклу будівельного проєкту

Джерело: розроблено автором.

Домінуючі ризики, власники реагування та критичні докази переходу між фазами систематизовано у таблиці 3.6. Вона забезпечує фазову узгодженість договорів, даних і контрольних точок. Таке структурування дає змогу співвіднести характер ризику не лише з етапом життєвого циклу, а й із суб'єктом, який має необхідні повноваження, інформаційний доступ і ресурси для своєчасного реагування. Фіксація критичного доказу переходу формує формалізовану умову зміни управлінського стану проєкту та обмежує можливість переходу до наступної фази за неповної або неперевіреної інформації. Водночас фазова диференціація відповідальності запобігає механічному перенесенню рольової конфігурації між стадіями, оскільки зі зміною фази змінюються джерела ризику, масштаб наслідків і спроможність окремих учасників впливати на них. У результаті формується основа для динамічної перерозподілу ризиків відповідно до фактичної конфігурації проєкту, а не лише початкових контрактних положень. Запропонована матриця також забезпечує методологічний зв'язок між фазовою структурою життєвого циклу, цифровими доказами та процедурою перегляду відповідальності підприємств-стейкхолдерів. Проєкт не повинен переходити до закупівлі без підтвердженої готовності проєктних даних, а до експлуатації

– без виконавчої моделі, випробувань і передачі власності на інформаційні активи.

Таблиця 3.16

Ризики та суб'єкти реагування за фазами життєвого циклу

Фаза	Домінуючі ризики	Власник реагування	Критичний доказ переходу
Потреба та ініціація	необґрунтована потреба; конфлікт пріоритетів; відсутність фінансової перспективи	портфельний орган; ініціатор; власник публічної політики	підтверджена потреба, пріоритет, попередня оцінка цінності та фінансування
Концепція і обґрунтування	оптимістичний кошторис; недооцінена невизначеність; неприйнятна LCC	замовник; автор обґрунтування; незалежний експерт	сценарний аналіз, референтний прогноз, реєстр припущень
Проектування	неповні вихідні дані; колізії; невідповідність ESG та експлуатаційним вимогам	проектувальник; замовник; технічний верифікатор	узгоджена модель, результати перевірок, журнал рішень і змін
Закупівля і контрактування	низька конкуренція; демпінг; неспроможність; незбалансована передача ризику	замовник закупівлі; тендерна група; фінансова установа	оцінка спроможності, обґрунтування ціни, рольова матриця в договорі
Будівництво	строк; ціни; дефіцит ресурсів; якість; безпека; повторне пошкодження	керівник проекту; підрядник; інженер; замовник	актуальний графік, фактичні обсяги, KRI, акти і геоприв'язані докази
Введення в експлуатацію	неповнота випробувань; невідповідність результату; дефекти документації	комісія приймання; замовник; оператор	протоколи випробувань, виконавча модель, паспорти активів
Експлуатація і повторне використання	надійність; енерговитрати; викиди; обслуговування; кінець циклу	оператор; власник активу; сервісні підприємства	цифровий паспорт, дані експлуатації, план обслуговування і демонтажу

Джерело: розроблено автором.

Цифровізація зменшує інформаційну асиметрію, але створює нові джерела ризику. Недоступність спільного середовища даних, несанкціонована зміна моделі, компрометація облікових записів, несумісність довідників або

залежність від одного постачальника програмного забезпечення можуть зупинити матеріальні процеси та позбавити проєкт доказів виконання.

NIST CSF 2.0 посилює функцію врядування і управління кіберризиками ланцюга постачання, а NIS 2 установлює вимоги до аналізу ризиків, реагування, безперервності, резервного відновлення, контролю доступу та повідомлення про інциденти [201–203]. Для будівельної екосистеми контракт із цифровим постачальником має визначати власника даних, формат експорту, RTO/RPO, строк повідомлення, право аудиту та порядок зміни сервісу.

Розподіл цифрових і кіберризиків наведено у таблиці 3.17. Платформа забезпечує інфраструктуру, але не замінює власника змістової достовірності первинного запису. Розмежування технологічної експлуатацію сервісу та управлінську відповідальність за дані. Такий поділ запобігає перекладанню змістової помилки на оператора платформи і водночас покладає на нього контроль доступності, цілісності та відновлення.

Таблиця 3.17

Алокація цифрових і кіберризиків у будівельній проєктній екосистемі

Ризик	Власник даних	Власник реагування	Обов'язковий контроль
Несумісність моделей і довідників	замовник інформаційних вимог; автор моделі	керівник інформаційного менеджменту	єдина схема даних, правила найменування, автоматична перевірка форматів
Несанкціонована зміна документа або моделі	автор запису; оператор середовища даних	власник інформаційної безпеки; керівник проєкту	рольовий доступ, електронний підпис, журнал версій, контроль цілісності
Недоступність платформи або сервісу	оператор платформи	оператор і власник безперервності проєкту	резервування, RTO, план відновлення
Компрометація постачальника цифрового сервісу	постачальник; замовник контрактних даних	власник кіберризiku ланцюга постачання	вимоги до постачальника, повідомлення, право аудиту, план заміни
Неповні або недостовірні первинні дані	суб'єкт, який створює запис	власник процесу та незалежний верифікатор	валідаційні правила, доказ походження, подвійне підтвердження критичних даних
Втрата переносності даних	замовник і оператор системи	власник цифрової архітектури	відкриті формати, регулярний експорт, тест відновлення і міграції
Несвоєчасне повідомлення про інцидент	суб'єкт, який виявив подію	визначений комунікаційний центр	порогова класифікація, маршрут ескалації, журнал повідомлень

Джерело: сформовано автором з урахуванням [201–203].

Операційним носієм механізму є цифровий паспорт ризику. На відміну від класичного реєстру, який фіксує назву, імовірність, вплив і одного власника, паспорт поєднує причинний опис, KRI, джерела даних, рольовий вектор, план реагування, резерв, доказ результату та тригери перерозподілу. Він пов'язується з елементом BIM, графіком, кошторисом, контрактом, активом або ESG-вимогою.

Рольовий вектор ризику і на фазі I подано як:

$$R_i^I = \langle D_i^I, O_i^I, E_i^I, F_i^I, C_i^I; \tau_i^I, q_i^I \rangle, \quad (3.3)$$

де D – власник даних; O – власник реагування; E – виконавець заходу; F – носій резерву; C – суб'єкт зовнішньої комунікації; τ – тригер перегляду; q – статус доказовості. Статус q визначається повнотою обов'язкових доказів, актуальністю даних і результатом верифікації, а не суб'єктивною впевненістю учасника.

Обов'язкові реквізити цифрового паспорта систематизовано у таблиці 3.18. Їх мінімальний склад забезпечує однозначність, раннє виявлення, ресурсне покриття та організаційне навчання.

Таблиця 3.18

Реквізити цифрового паспорта ризику

Блок	Зміст	Управлінське призначення
Ідентифікаційний	код, назва, пов'язаний об'єкт, фаза, дата створення, версія	однозначна прив'язка до проєкту, активу, контракту або вимоги
Причинний	джерело, подія, причинний ланцюг, взаємозалежні ризики	відокремлення причини від наслідку
Оціночний	імовірність, наслідки, сценарії, горизонт, толерантність	вибір пріоритету та масштабу реагування
Індикативний	KRI, поріг, джерело, частота, власник даних, якість	раннє виявлення і доказовість сигналу
Рольовий	п'ять ролей, повноваження, ліміти, конфлікти інтересів	функціональне розмежування відповідальності
Реагування	превентивна дія, план на випадок події, строк, виконавець	перехід від оцінки до конкретної дії
Фінансовий	резерв, страховка, гарантія, джерело покриття, ліміт	ресурсне забезпечення рішення і контроль залишкового ризику
Доказовий	журнал змін, документи, модельні елементи, фото, підписи, перевірка	відтворюваність, аудит і захист від стратегічного викривлення
Динамічний	тригери, дата перегляду, попередня і нова конфігурація	керована зміна ролей протягом життєвого циклу

Джерело: розроблено автором.

Таблиця 3.18 задає регламент цифрового запису, придатного для інтеграції з CDE, BIM, ERP, DREAM, електронними закупівлями та аналітичними панелями. Відсутність будь-якого критичного блоку знижує q і обмежує використання ризикової оцінки в автоматизованому рішенні.

Реалізація механізму передбачає послідовність процедур від ідентифікації причинного об'єкта до переалокції та інституціоналізації досвіду. Спочатку ризик позиціонується у багатовимірній таксономії, потім визначаються сценарії, KRI і межі толерантності. Для кожної ролі оцінюється придатність стейкхолдерів, після чого рольовий вектор закріплюється у договорі, регламенті та цифровому паспорті.

У контрольних точках система перевіряє пороги, строки й повноту доказів. Спрацювання тригера запускає повторне оцінювання критеріїв, документоване рішення та оновлення контрактних і цифрових правил. Завершення циклу передбачає аналіз причин відхилення і перенесення уроків у шаблони договорів, критерії добору контрагентів та бібліотеку сценаріїв.

Узагальнення сформованих положень дає змогу представити адаптивну алокацію ризиків як замкнений механізм, у якому контекст цифрової екосистеми визначає ризикове поле, архітектурні рівні задають контури управлінського впливу, а критеріально-рольова конфігурація забезпечує доказове закріплення відповідальності між підприємствами-стейкхолдерами [271]. Результатом функціонування механізму є не статичне призначення носія ризику, а документована конфігурація ролей, резервів, цифрових доказів і управлінських рішень, здатна змінюватися відповідно до параметрів проєкту. Узагальнену логіку функціонування механізму наведено на рис. 3.14.

Представлена архітектоніка поєднує причинний, інституційний, економічний, цифровий і рольовий виміри алокації в єдиному управлінському контурі. Принциповою властивістю механізму є його рекурсивність: зміна нормативної вимоги, параметрів проєкту, цифрових доказів, складу учасників або рівня їхньої спроможності ініціює повторне оцінювання ризику та перегляд сформованої рольової конфігурації. Відповідно, результат алокації

набуває статусу керованого стану, а не незмінного договірною закріплення відповідальності.

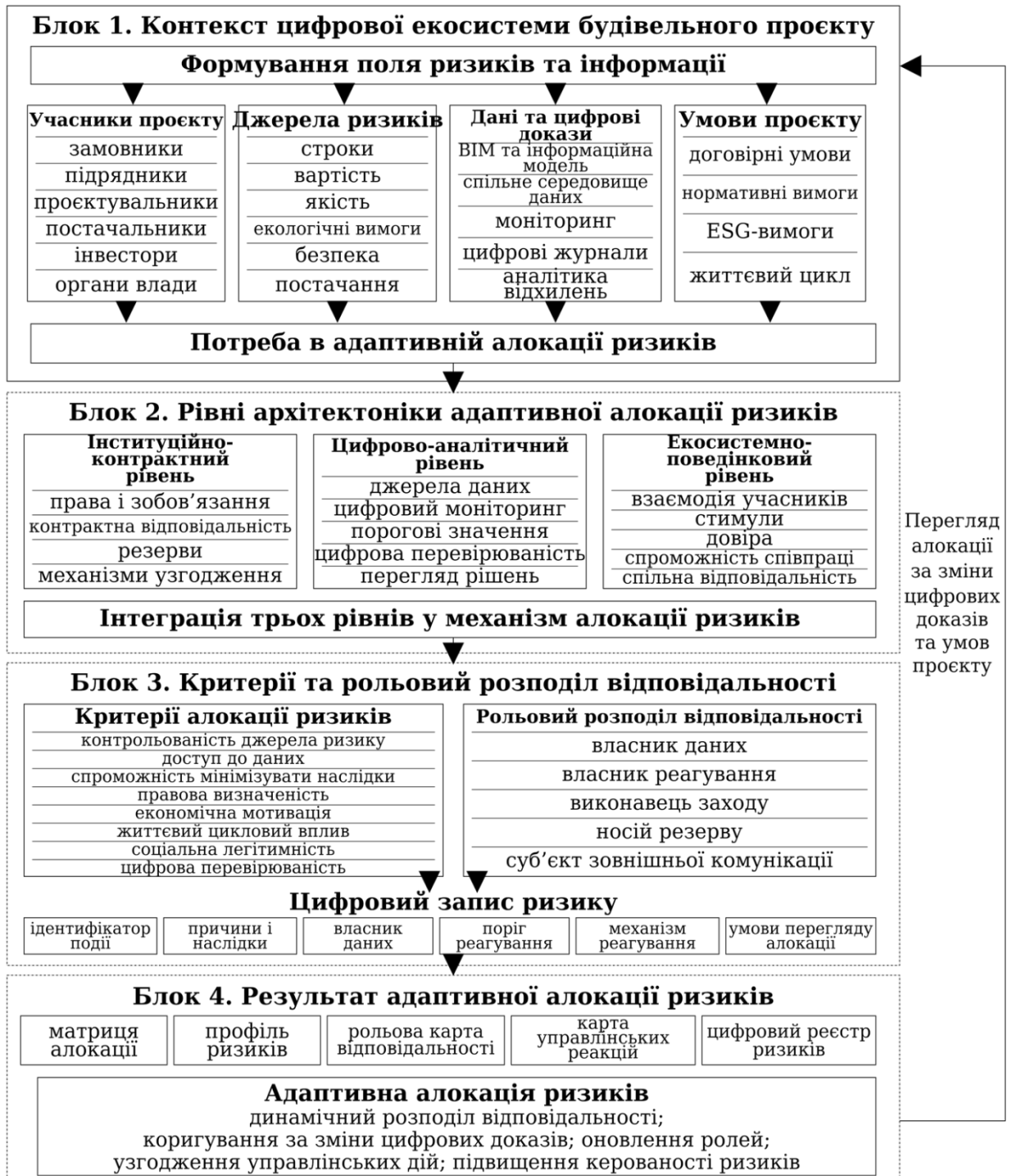


Рис. 3.14. Архітектура адаптивної алокації ризиків між підприємствами-стейкхолдерами у цифровій екосистемі будівельного проєкту

Джерело: розроблено автором.

Для операціоналізації цієї логіки послідовність процедур механізму систематизовано в таблиці 3.19.

Таблиця 3.19

Етапи механізму адаптивної алокації та динамічного управління ризиками

Етап	Зміст операції	Результат
1. Ідентифікація	визначення об'єкта, події, джерела та пов'язаних елементів проєкту	однозначний запис ризику без дублювання
2. Структурування	класифікація за джерелом, наслідком, фазою та інформаційним станом	позиція у багатовимірному просторі ризиків
3. Квантифікація	сценарії, імовірність, наслідки, взаємозалежність і толерантність	пріоритет і межі прийнятності
4. Визначення KRI	джерело, поріг, частота, якість і строк ескалації	ранній верифікований сигнал
5. Оцінювання стейкхолдерів	застосування восьми критеріїв окремо для кожної ролі	рейтинги придатності та виявлені обмеження
6. Формування рольового вектора	призначення власника даних, реагування, виконавця, резерву і комунікації	збалансована конфігурація відповідальності
7. Контрактно-цифрове закріплення	внесення ролей, лімітів, строків, доказів і тригерів у договори та паспорт	операціоналізоване правило управління
8. Моніторинг і реагування	контроль KRI, виконання дій, ескалація та використання резерву	локалізація події та контроль наслідків
9. Переалюкація і навчання	перегляд ролей за тригерами, аналіз причин і оновлення правил	адаптація системи та накопичення знань

Джерело: розроблено автором.

Таблиця 3.19 формує замкнений цикл адаптивного управління. Переалюкація не є ознакою нестабільності договору; заздалегідь погоджена процедура зміни ролей знижує конфліктність, оскільки рішення спирається на критерії та цифрові докази, а не на переговорну силу після настання збитку.

Результативність механізму повинна оцінюватися не кількістю зареєстрованих ризиків, а скороченням очікуваних втрат, часу реакції та трансакційних витрат координації.

Сформована модель створює методологічне підґрунтя для обґрунтування пріоритетів цифрової трансформації проєктної екосистеми з урахуванням управлінської значущості окремих процесів, критичності даних і очікуваного ефекту від цифрових інвестицій. Її застосування дає змогу зіставляти потребу у впровадженні цифрових рішень із наявною

інформаційною архітектурою, виявляти функціональне дублювання систем і запобігати фрагментації цифрового середовища між учасниками проєкту. Одночасно модель формалізує вимоги до повноти, актуальності, достовірності, сумісності, простежуваності та захищеності даних, що використовуються для планування, моніторингу й прийняття управлінських рішень. На цій основі цифрові функції та відповідальність можуть бути диференційовано закріплені за замовником, проєктувальником, підрядником, постачальником і експлуатуючою організацією відповідно до їх повноважень, доступу до первинних даних та спроможності забезпечувати їх верифікацію. Такий розподіл зменшує інформаційну асиметрію, усуває невизначеність щодо власності й відповідальності за дані та забезпечує безперервність інформаційного супроводу об'єкта протягом життєвого циклу. У результаті цифровізація набуває характеру керованого інвестиційного процесу, в якому технологічні рішення узгоджуються зі стратегічними цілями, економічною доцільністю та вимогами біосферосумісного будівництва.

3.3. Цифровий інструментарій реалізації стратегічних цілей проєктів біосферосумісного будівництва

Цифрова трансформація будівництва часто ототожнюється з упровадженням окремого програмного продукту, переведенням документів в електронний формат або створенням тривимірної моделі об'єкта. Таке трактування звужує її управлінський зміст. Технологія набуває стратегічного значення лише тоді, коли забезпечує простежуваний зв'язок між ціллю проєкту, вимірюваним результатом, первинними даними, аналітичним правилом, управлінським рішенням і підтвердженням досягнутого ефекту. За відсутності цього зв'язку цифровізація прискорює окремі операції, але не усуває інформаційну асиметрію, розриви відповідальності та неузгодженість рішень підприємств-стейкхолдерів.

Наукова проблема полягає у фрагментарності цифрового середовища будівельного проєкту. Реєстрові системи, кошторисні комплекси, інформаційні моделі, корпоративні ERP, платформи закупівель, системи моніторингу експлуатації та екологічні бази даних формують різні інформаційні контури. Вони мають відмінні ідентифікатори, класифікатори, правила актуалізації та рівні доказовості. Тому наявність цифрових даних не гарантує їх придатності для інтегрованого управління вартістю, строками, ресурсами, ризиками, викидами, енергоефективністю та соціальними результатами.

У межах дослідження цифровий інструментарій реалізації стратегічних цілей проєкту біосферосумісного будівництва запропоновано трактувати як інтероперабельну сукупність реєстрів, інформаційних моделей, корпоративних систем, аналітичних методів, цифрових паспортів, контрольних подій і правил врядування даними, яка перетворює стратегічну ціль на верифіковану послідовність інформаційних вимог, рішень і результатів упродовж життєвого циклу об'єкта. Предметом управління є не програмне забезпечення як таке, а інформаційна спроможність проєктної екосистеми координувати дії учасників і підтверджувати досягнення економічних, екологічних, соціальних та цифрових параметрів.

Емпіричну основу підрозділу сформовано за даними Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва, цифрової екосистеми DREAM, матеріалами реформи управління публічними інвестиціями, статистикою Eurostat щодо використання хмарних сервісів, ERP, CRM, BI та штучного інтелекту підприємствами ЄС, аналізом упровадження BIM у державах ЄС, а також положеннями ISO 19650, ISO 16739, оновленої Директиви ЄС про енергетичну ефективність будівель і Регламенту ЄС про будівельну продукцію. Таке поєднання дає змогу оцінити цифровізацію на інституційному, корпоративному та життєвоцикловому рівнях [204–215].

Завдання підрозділу полягає у структуруванні функціональної моделі цифрового інструментарію, яка поєднує спільне середовище даних,

інформаційну модель об'єкта, цифровий двійник, модулі поточного моніторингу, аналітики, прогнозування, оцінювання життєвого циклу та багатокритеріального вибору у цільово-трасувальний ланцюг «стратегічна ціль – показник – джерело даних – цифровий інструмент – управлінське рішення – верифікація результату». Така постановка зміщує предмет дослідження від переліку технологій до їх функціональної спроможності забезпечувати простежуваний вплив цифровізації на економічні, екологічні, соціальні та управлінські результати проєкту.

Методологічно цифрове забезпечення доцільно розглядати як взаємодію функціональних контурів даних, моделювання, поточного моніторингу, цифрового двійника, аналітики й прогнозування, оцінювання життєвого циклу, багатокритеріального вибору та управлінського контролю. Спільне середовище даних і інформаційна модель об'єкта утворюють цифрове ядро, навколо якого формуються потоки фактичних даних, аналітичні процедури та контури зворотного зв'язку. Результативність такого ядра визначається не деталізацією моделі як такою, а її зв'язком із бюджетом, графіком, матеріальними потоками, ризиками, ESG-параметрами та процедурами перевірки досягнутих результатів [10–12; 27–30; 42; 88; 125; 129; 130; 139–141].

Стратегічна ціль стає цифрово досяжною, якщо для неї встановлено вимірюваний результат, визначено склад і якість необхідних даних, закріплено цифрове джерело, сформовано алгоритм інтерпретації, задано контрольну подію та призначено суб'єкта, який ухвалює рішення й відповідає за верифікацію результату. Цифрова досяжність відрізняється від технічної автоматизації тим, що охоплює повний причинно-наслідковий ланцюг, а не лише швидкість виконання операції.

Для біосферосумісного будівництва ця вимога має особливе значення. Цілі мінімізації життєвоциклової вартості, скорочення вуглецевого сліду, повторного використання матеріалів, забезпечення енергетичної результативності та безпечності не можуть бути підтверджені лише актом

завершення будівельних робіт. Необхідні дані про походження матеріалів, фактичні обсяги, енергетичні характеристики, сценарії експлуатації, заміни компонентів, утворення відходів і результати моніторингу. Отже, цифровий інструментарій повинен підтримувати не окремий етап, а безперервність інформації від формування потреби до експлуатації та завершення життєвого циклу.

Розмежування базових понять подано в таблиці 3.20. Воно усуває термінологічне змішування, за якого електронний документ, автоматизована процедура, BIM-модель і цифрова екосистема розглядаються як рівнозначні прояви цифровізації.

Таблиця 3.20

**Методологічне розмежування форм цифрової трансформації
будівельного проєкту**

Категорія	Предмет зміни	Управлінський результат	Обмеження
Оцифрування	перетворення паперових або аналогових даних у цифрову форму	доступність, копіювання, пошук і зберігання	не змінює логіку процесу та відповідальність
Автоматизація	виконання формалізованої операції без ручного втручання	скорочення строку, зменшення транзакційних витрат і вибірковості рішень	може відтворювати помилкове правило або недостовірні дані
Цифровізація процесу	перебудова послідовності дій на основі структурованих даних	контрольованість, журналювання, інтеграція учасників	результат обмежений межами одного процесу
Інформаційне моделювання	керування структурованою інформацією про об'єкт та його властивості	координація проєктування, 4D/5D-аналіз, передавання даних експлуатації	без стандартів і вимог модель перетворюється на ізольований файл
Цифровий двійник	динамічне поєднання моделі з фактичними даними про стан об'єкта	предиктивне управління експлуатацією, енергією, технічним обслуговуванням	потребує надійної сенсорної та інформаційної інфраструктури
Цифрова екосистема	інтероперабельна взаємодія реєстрів, підприємств, моделей, платформ і правил	наскрізне управління цінністю, ризиками та результатами життєвого циклу	залежить від врядування даними, відкритих стандартів і розподілу відповідальності

Джерело: розроблено автором.

Поглиблення цифрової трансформації відбувається через зміну предмета управління: від форми подання даних до міжорганізаційної координації життєвого циклу. Технологічна наявність не може бути самостійним критерієм цифрової зрілості. Таке розмежування необхідне для встановлення різного управлінського змісту, функціонального призначення та рівня цифрової зрілості кожної форми трансформації. Воно дає змогу перейти від формального оцінювання факту використання цифрових технологій до визначення їх реальної спроможності змінювати інформаційні потоки, механізми координації, процедури прийняття рішень і взаємодію підприємств-стейкхолдерів. Сформована категоріальна диференціація також створює методологічну основу для подальшого обґрунтування архітектоніки цифрового інструментарію та визначення послідовності переходу від локальної автоматизації до життєвоциклової цифрової інтеграції проєкту біосферосумісного будівництва. Цифрова досяжність стратегічної цілі визначається повнотою інформаційного покриття, інтероперабельністю джерел, верифікованістю даних і рішень, своєчасністю надходження сигналу та захищеністю цифрового контуру.

Недостатність будь-якої з названих характеристик обмежує управлінський результат незалежно від кількості застосованих технологій. Високодеталізована BIM-модель не забезпечує цифрової досяжності, якщо вона не пов'язана з кошторисом, графіком, реєстром матеріалів і фактичними даними. Автоматична реєстрація документа також не гарантує результативності, коли первинні відомості не мають однозначного об'єктного ідентифікатора або не передаються до наступної фази життєвого циклу. Логіку цифрової досяжності стратегічної цілі подано на рис. 3.15. Фіксує контрольні ланки, в яких стратегічний намір може втратити вимірюваність або доказовість. Його застосування дає змогу локалізувати інформаційний розрив і визначити, який елемент цифрового контуру потребує коригування.

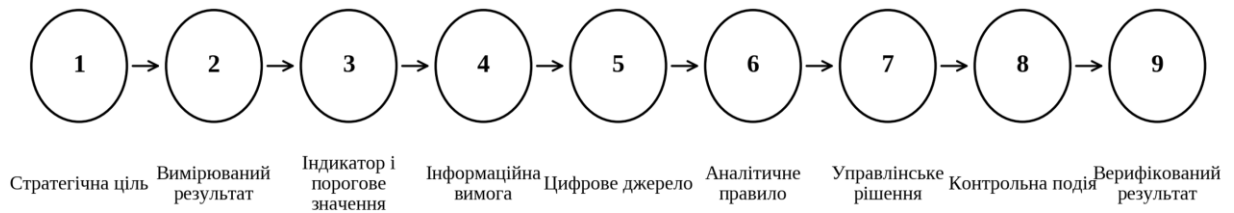


**Рис. 3.15. Контур цифрової досяжності стратегічної цілі проєкту
біосферосумісного будівництва**

Джерело: розроблено автором.

Інституційний контур цифровізації в Україні формується навколо ЄДЕССБ, містобудівного кадастру державного рівня, Єдиного державного реєстру адрес, порталу Дія, мережі ЦНАП, DREAM, Prozorro, Реєстру пошкодженого та знищеного майна й інших державних інформаційних ресурсів. Його еволюція засвідчує перехід від електронної подачі документів до реєстрової взаємодії, автоматичної реєстрації та портфельного управління публічними інвестиціями.

У сучасних дослідженнях BIM розглядається не лише як засіб тривимірного моделювання об'єкта, а як основа формування комплексної інформаційної моделі, що забезпечує інтеграцію даних та підтримку управлінських процесів у будівництві [209]. В українському нормативно-інституційному контурі подальше поширення такого підходу пов'язане із запровадженням будівельного інформаційного моделювання на всіх етапах життєвого циклу об'єктів [210].

Формування інституційного контуру має кумулятивний характер: кожний новий компонент не скасовує попередній, а підвищує вимоги до сумісності даних. Реєстр дозвільних документів створює юридично значущий цифровий слід; DREAM структурує інвестиційний цикл; BIM деталізує об'єкт і рішення; корпоративні системи відображають ресурси та зобов'язання; цифрові паспорти будівель і продукції мають забезпечити передавання даних до експлуатації та повторного використання.

Кумулятивне формування інституційного цифрового контуру узагальнено на рис. 3.16. Подальший розвиток визначається не кількістю реєстрів, а якістю їх причинно-логічного зв'язку.



Рис. 3.16. Етапи формування цифрового інституційного контуру будівництва

Джерело: узагальнено автором за [27; 204–210].

Функціональне призначення державних цифрових систем узагальнено в таблиці 3.22.

Виявлено функціональну розподіленість державного цифрового контуру та одночасно його інтеграційні розриви. Управлінський ефект виникає лише за умови поєднання юридично значущих записів із моделлю об'єкта, фінансуванням, закупівлею, фактичним виконанням і експлуатаційними результатами.

Операційні показники ЄДЕССБ дають змогу оцінити не лише масштаби електронного документообігу, а й структуру цифрової активності галузі. У III кварталі 2024 року в системі було створено понад 41 тис. дозвільних документів, майже 11 тис. проєктних документів і понад 200 тис. технічних інвентаризацій. У відповідному кварталі 2025 року зареєстровано 37,3 тис. дозвільних і ввідних документів, понад 12 тис. проєктних рішень та 195 тис. технічних інвентаризацій. Порівняння не є індексом будівельної активності, оскільки склад категорії дозвільних документів у звітах відрізняється, але воно характеризує стабільно високий транзакційний масштаб системи.

Зростання кількості проєктних рішень за одночасного незначного скорочення технічних інвентаризацій і дозвільних документів свідчить про різноспрямованість цифрових потоків. Тому оцінювати результативність ЄДЕССБ лише сумарною кількістю записів методологічно недостатньо.

Необхідні коефіцієнти повноти об'єктного профілю, частки автоматично верифікованих документів, кількості міжреєстрових зв'язків та частки об'єктів, для яких цифровий слід продовжується після введення в експлуатацію.

Таблиця 3.21

**Функціональне призначення державних цифрових систем у життєвому
циклі будівельного проєкту**

Система	Управлінська функція	Основний цифровий результат	Інтеграційне обмеження
ЄДЕССБ	реєстрація документів і прав, дозвільні та контрольні процедури, відомості про об'єкти	юридично значущий реєстровий запис, версія документа, статус об'єкта	необхідність повного зв'язку з BIM-моделлю, матеріалами, кошторисом і експлуатаційними даними
Містобудівний кадастр державного рівня та ЄДРА	просторове планування, верифіковані адреси й геопросторові дані	просторова прив'язка об'єкта та нормативних обмежень	нерівномірність наповнення, якість і актуальність місцевих геоданих
DREAM	підготовка, оцінювання, пріоритизація, фінансування та моніторинг публічних інвестицій	цифровий профіль проєкту й портфеля, етап, потреба, фінансування, показники	необхідність синхронізації з бюджетними, закупівельними, будівельними та експлуатаційними системами
Prozorro	відкриті закупівлі, конкуренція, контрагування і публічність процедур	тендерні дані, договір, зміни, учасники та ціни	обмежений зв'язок з об'єктною моделлю, фактичним виконанням і життєвоцикловими результатами
Дія та ЦНАП	цифровий і фізично доступний канали надання адміністративних послуг	заява, результат послуги, статус, автоматична реєстрація	відмінності у рівнях автоматизації та потреба у єдиних правилах валідації
Реєстр пошкодженого та знищеного майна	фіксація пошкоджень, компенсаційний і відновлювальний контур	верифікований факт пошкодження та характеристики об'єкта	необхідність поєднання з проєктом відновлення, кошторисом і новим цифровим паспортом

Джерело: розроблено автором за [204–210].

Рис. 3.17 підтверджує високий транзакційний масштаб ЄДЕССБ, проте кількість записів не характеризує повноту життєвоциклового профілю об'єкта. Кількісні показники мають доповнюватися метриками зв'язності, автоматичної верифікації та безперервності цифрового сліду.

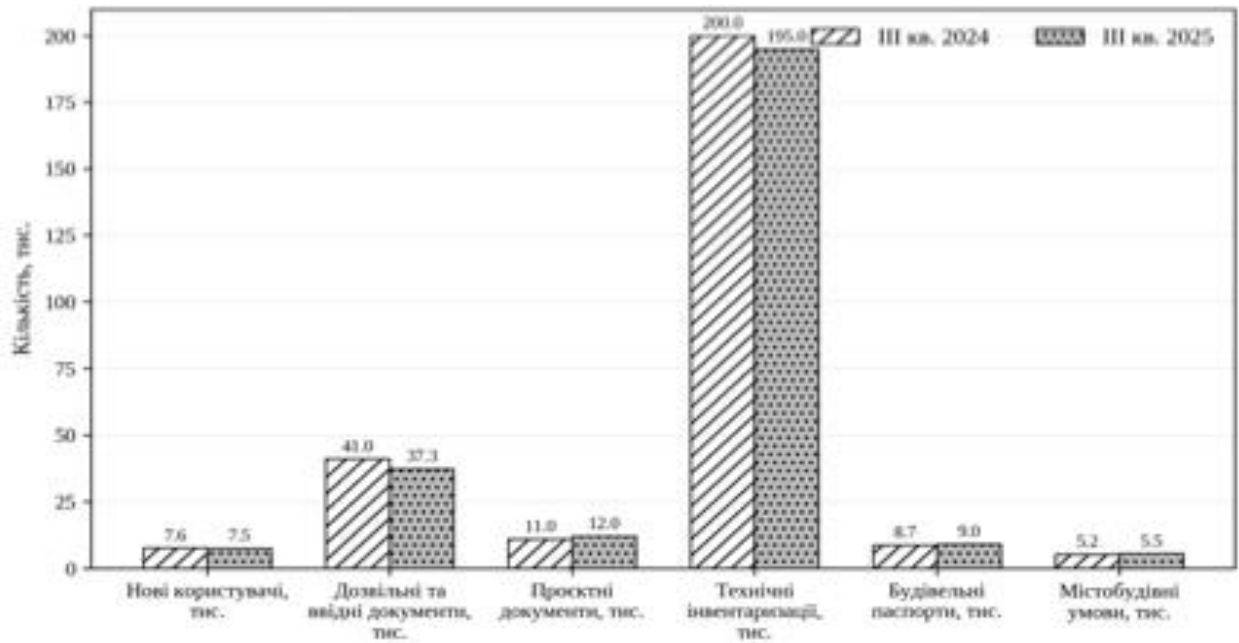


Рис. 3.17. Операційна активність ЄДЕССБ у III кварталах 2024 та 2025 років

Джерело: побудовано автором за [204; 205].

Станом на липень 2024 року в ЄДЕССБ було зареєстровано понад 105 тис. користувачів; через портал Дія надано майже 163 тис. будівельних послуг, а через ЦНАП – понад 282 тис. Окрім каналів взаємодії, система акумулювала більш як 2 млн відомостей про технічні інвентаризації, 90,6 тис. проєктних документацій, 556,1 тис. дозвільних документів, майже 130 тис. будівельних паспортів і 65,5 тис. містобудівних умов та обмежень. Цей масив створює значний потенціал для галузевої аналітики, але його управлінська цінність залежить від структурованості та зв'язності записів.

Перевага ЦНАП як каналу надання послуг у кумулятивному вимірі відображає гібридну модель цифрової трансформації, у якій електронна система поєднується з фізично доступною інфраструктурою. Така модель зменшує бар'єри доступу, однак потребує однакових алгоритмів перевірки, черговості й автоматичної реєстрації незалежно від каналу подання.

У III кварталі 2025 року рівень автоматичної реєстрації документів, для яких відповідний функціонал був активований, становив 32 %. Для документів, поданих через Дію, показник дорівнював 33 %, через ЦНАП – 30 %. Автоматизація зменшує часові й корупційні ризики лише за умови

формалізованих критеріїв, верифікованих довідників і можливості відтворити підставу машинного рішення.

Відмінність між каналами подання є відносно невеликою, що підтверджує уніфікацію базової процедури. Водночас частка документів, що потребують реєстраційного втручання, залишається переважною. Сформований стан визначає напрям подальшого розвитку: перехід від автоматизації реєстрації до автоматизованої перевірки повноти інформаційного профілю об'єкта, міждокументних залежностей і відповідності нормативним та просторовим обмеженням.

Рівень автоматичної реєстрації документів наведено на рис. 3.18. Засвідчено частковий характер автоматизації реєстраційних процедур. Наступним етапом має стати автоматизована перевірка повноти, взаємозалежності й нормативної узгодженості даних, а не лише технічне прийняття документа.

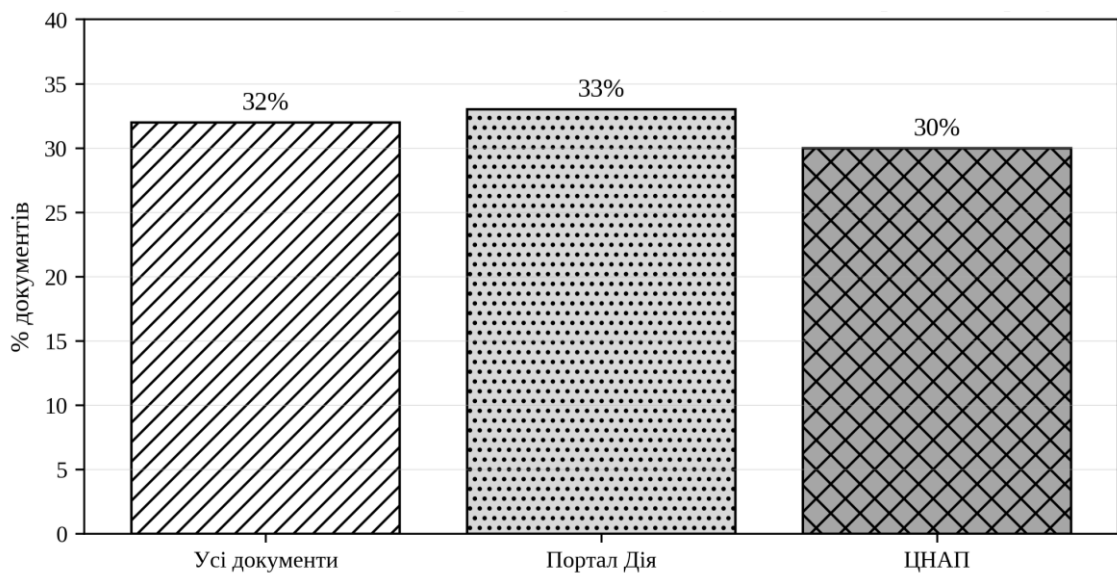


Рис. 3.18. Рівень автоматичної реєстрації документів у ЄДЕССБ у III кварталі 2025 року

Джерело: побудовано автором за [205].

У I кварталі 2026 року цифрова екосистема містобудування та будівництва була доповнена взаємодією ЄДЕССБ з Єдиним державним реєстром адрес, функціоналом структурованих даних про самочинне будівництво, автоматичною первинною реєстрацією спеціальних майнових

прав і мобільним застосунком «Прозоре будівництво». Автоматично зареєстровано понад 900 об'єктів, що включали 117,6 тис. майбутніх об'єктів нерухомості; до ЄДРА підключено 1302 громади. Наведені зміни демонструють перехід від цифровізації документа до цифровізації об'єктної ідентичності та міжреєстрової взаємодії.

DREAM принципово відрізняється від реєстру будівельних документів: її предметом є не юридичне оформлення окремої будівельної дії, а логіка підготовки, оцінювання, пріоритизації, фінансування та моніторингу інвестиційного проєкту. У 2025 році реформа управління публічними інвестиціями сформувала Єдиний проєктний портфель на 2026 рік, до якого включено 131 інвестиційний проєкт і 64 програми загальною вартістю 256,5 млрд євро. На місцевому рівні сформовано 840 середньострокових планів, а 672 громади та 22 обласні військові адміністрації перейшли до експертного оцінювання і формування портфелів [208].

Кількісний масштаб портфеля не є самодостатньою характеристикою цифрової зрілості. Визначальною є здатність системи зберігати причинний зв'язок між проблемою, стратегічною ціллю, варіантами розв'язання, життєвоцикловою вартістю, джерелом фінансування, закупівлею, виконанням і результатом. Якщо дані про підготовку проєкту не переходять до контрактного та будівельного контуру, портфельна аналітика завершується на етапі відбору і не забезпечує контролю цінності.

Для проєктів біосферосумісного будівництва профіль DREAM доцільно доповнювати машиночитними показниками енергоефективності, життєвоциклових викидів, ресурсної циркулярності, кліматичної вразливості та витрат експлуатації. Такі показники повинні мати цифрові джерела доказів, а не заповнюватися виключно декларативно. Тоді портфельний відбір зможе враховувати не лише капітальну вартість, а й довгострокову суспільну та екологічну результативність. Для забезпечення цінності портфельний профіль повинен зберігати зв'язок із контрактом, будівельним виконанням, експлуатаційними показниками та фактичним суспільним ефектом.

Методичні вимоги до інтеграції DREAM з цифровим контуром проєкту наведено в таблиці 3.22, в якій формалізовано контрольні залежності між портфельним рішенням і цифровими доказами наступних фаз. Така структура запобігає переходу проєкту до фінансування або контрагування без підтвердженої потреби, зіставлення альтернатив і достатньої готовності даних.

Таблиця 3.22

**Методичні вимоги до інтеграції DREAM з цифровим контуром
будівельного проєкту**

Елемент	Цифровий доказ	Джерело	Контрольна залежність
Підтверджена потреба	просторові, демографічні, технічні та сервісні дані	DREAM, геоінформаційні системи, реєстри активів	відповідність проблеми стратегічним документам і фактичному дефіциту
Варіант реалізації	порівняння сценаріїв, LCC, LCA, ризикова оцінка	DREAM, BIM, аналітичний модуль	заборона переходу без зіставлення альтернатив
Кошторис і графік	об'єктно пов'язані обсяги, ціни, ресурси та строки	BIM 4D/5D, кошторисна система, база цін	узгодження з проєктними рішеннями та індексами ризику
Фінансування	джерело, ліміт, календар і умови використання	DREAM, бюджетні та казначейські системи	фінансове покриття фаз і залишкових ризиків
Закупівля і контракт	предмет, учасник, ціна, зміни, гарантії, матриця ризиків	Prozorro, е-контракт, реєстр ризиків	зв'язок лота з моделлю, графіком і контрольними результатами
Реалізація	фактичні обсяги, якість, KRI, акти, фото- та модельні докази	ЄДЕССБ, BIM, мобільний контроль, DREAM	автоматичне виявлення відхилень і запуск управлінського тригера
Результат і ефект	введення, експлуатаційні KPI, енергія, викиди, доступність послуги	ЄДЕССБ, DBL, BMS, цифровий двійник, DREAM	порівняння фактичного ефекту з початковою стратегічною ціллю

Джерело: розроблено автором за [208].

Реєстрова цифровізація держави не автоматично трансформується у цифрову зрілість підприємств. Для оцінювання корпоративного рівня

використано статистику Eurostat за 2025 рік щодо платних хмарних сервісів, ERP, CRM, BI та технологій штучного інтелекту. Ці показники не охоплюють усі специфічні будівельні технології, але характеризують базову здатність підприємства інтегрувати ресурси, клієнтські та стейкхолдерські взаємодії, аналітику й масштабовані обчислювальні сервіси.

Будівництво відстає від середнього рівня підприємств ЄС за кожним із досліджених інструментів. Хмарні сервіси використовували 47,47 % будівельних підприємств проти 52,74 % у середньому. Для ERP розрив становив 10,67 відсоткового пункту, для CRM – 12,08, для BI – 9,51, для штучного інтелекту – 9,16. Найнижчою є частка BI – 6,77 %, що сигналізує не лише про технологічну, а й про аналітичну недостатність: дані можуть накопичуватися у виробничих і кошторисних системах, але не перетворюватися на систематичну підтримку управлінських рішень [211–213].

Особливо суттєвим є розрив між ERP і BI. ERP використовується більш ніж третиною будівельних підприємств, тоді як BI – менш ніж кожним п'ятнадцятим. Такий розрив означає, що первинний цифровий облік поширений значно більше, ніж інтегроване аналітичне використання інформації. Для економіко-цифрового управління стратегічним завданням є не механічне збільшення кількості систем, а перетворення операційних записів на узгоджені показники, сценарії та ранні сигнали.

Порівняльний цифровий розрив будівництва відображено на рис. 3.19. Виявлено, що найбільш суттєвий дефіцит будівництва пов'язаний не з базовою хмарною інфраструктурою, а з інтеграцією ресурсів, стейкхолдерських взаємодій, аналітики та прогнозування. Цифрова політика підприємств має пріоритезувати перетворення операційних записів на управлінські сигнали.

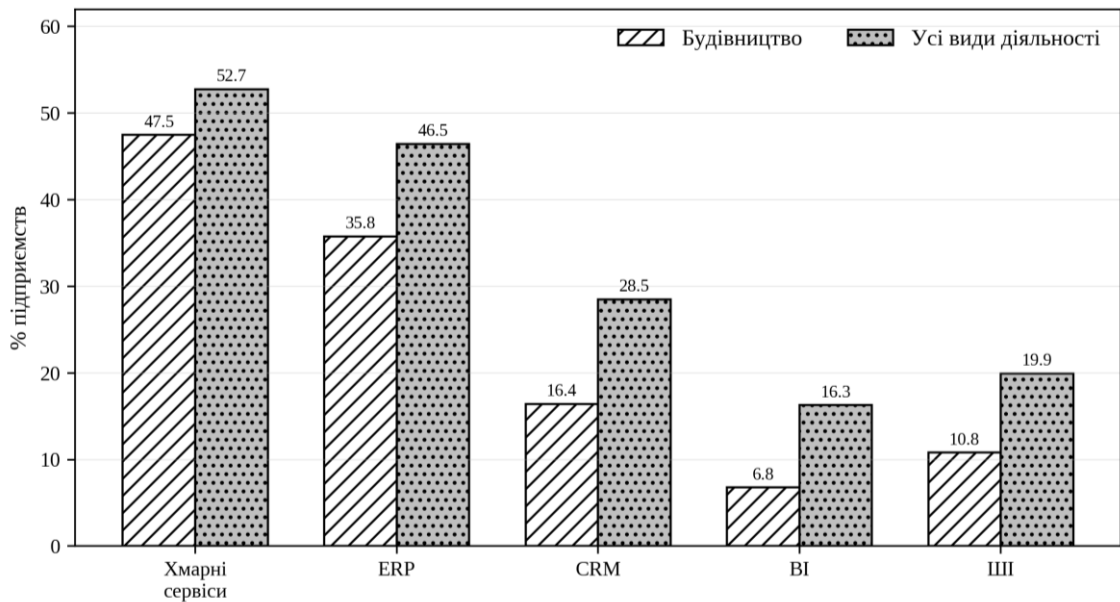


Рис. 3.19. Цифровий розрив будівництва відносно середнього рівня підприємств ЄС, 2025 рік

Джерело: побудовано автором за [211–213].

Аналіз цифрової оснащеності будівельних підприємств ЄС у 2025 році засвідчує стійке відставання галузі від середнього рівня за всіма дослідженими інструментами, однак характер цього розриву є неоднорідним. Найменше відставання спостерігається у використанні платних хмарних сервісів: 47,47 % у будівництві проти 52,74 % за всіма видами діяльності, що відповідає розриву 5,27 в. п., що свідчить про відносну доступність базової цифрової інфраструктури, але саме по собі не характеризує глибину інтеграції сервісів у виробничі та управлінські процеси. Значно більший розрив за ERP, який становить 10,67 в. п., вказує на недостатню інтеграцію ресурсного планування, фінансів, закупівель і виконання робіт у єдиному інформаційному контурі. Найбільше відставання зафіксовано у використанні CRM – 12,08 в. п., що відображає обмежене структурування взаємодії із замовниками, громадами та іншими стейкхолдерами проєктної екосистеми. Особливо показовим є низький рівень використання BI у будівництві – 6,77 % проти 16,28 % у середньому, що свідчить про дефіцит перетворення накопичених операційних даних на аналітичні висновки, прогнози та сигнали для управлінських рішень. Відставання у застосуванні штучного інтелекту на 9,16 в. п. додатково

засвідчує обмеженість використання алгоритмів прогнозування, розпізнавання, оптимізації та автоматизованої підтримки рішень. Сукупно ці результати дають підстави стверджувати, що цифровий розрив будівництва має не стільки інфраструктурний, скільки інтеграційно-аналітичний характер, а тому пріоритет цифрової трансформації має зміщуватися від нарощування кількості окремих систем до забезпечення їх взаємодії, консолідації даних і розвитку інструментів аналітичної підтримки

Використання платних хмарних сервісів у будівництві ЄС зросло з 37,69 % у 2023 році до 47,47 % у 2025 році, тобто на 9,78 відсоткового пункту. Для всіх видів діяльності приріст становив 7,42 відсоткового пункту. Отже, будівництво скорочувало відставання за інфраструктурною складовою швидше за середній темп, хоча абсолютний рівень залишався нижчим.

Хмарна інфраструктура має подвійний ефект. Вона зменшує бар'єр входу для підприємств, які не можуть утримувати власні обчислювальні потужності, і водночас створює залежність від постачальника, якості інтернет-з'єднання, кібербезпеки й умов доступу до даних. Тому впровадження хмари повинно супроводжуватися вимогами щодо експорту даних, резервного відновлення, розмежування прав та збереження доказового сліду.

Відбувається скорочення інфраструктурного відставання будівництва за використанням хмарних сервісів. Водночас зростає значення вимог до експорту даних, резервного відновлення, кіберзахисту та недопущення залежності від одного постачальника.

Корпоративна цифровізація має виражену масштабну асиметрію. У 2025 році хмарні сервіси використовували 49,30 % малих і 84,67 % великих підприємств ЄС; ERP – 41,08 і 88,71 %; CRM – 24,69 і 65,43 %; BI – 11,45 і 69,24 %; штучний інтелект – 17,00 і 55,03 % відповідно. Найбільший розрив сформувався у BI – 57,79 відсоткового пункту (рис. 3.20).

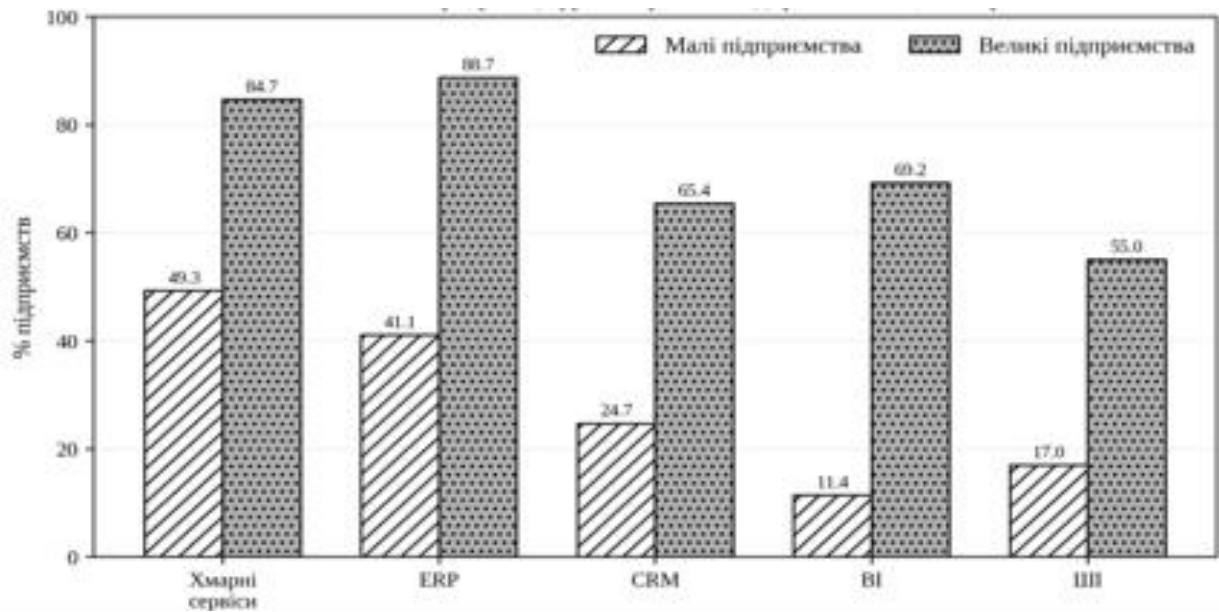


Рис. 3.20. Розрив цифрової зрілості підприємств ЄС, 2025 рік

Джерело: побудовано автором за [211–213].

Для проєктної екосистеми це означає, що цифрова зрілість замовника або генерального підрядника не гарантує цифрової інтегрованості ланцюга постачання. Малі проєктні, виробничі, сервісні та будівельні підприємства можуть мати достатні професійні компетентності, але не володіти засобами інтеграції та аналітики. Вимога застосовувати складну платформу без доступного інтерфейсу, відкритого формату й підтримки підвищує бар'єри участі та концентрацію ринку.

Отже, цифрові вимоги до контрагентів доцільно диференціювати за функцією в проєкті, критичністю даних і рівнем ризику, а не за принципом єдиного технологічного пакета. Система повинна приймати стандартизований мінімальний набір даних через доступні канали, тоді як складна аналітика може виконуватися на рівні інтеграційної платформи або координаційного центру.

Штучний інтелект у 2025 році використовували 19,95 % підприємств ЄС. У будівництві частка становила 10,79 % – найнижче значення серед видів діяльності, охоплених порівнянням Eurostat. В інформації та телекомунікаціях показник дорівнював 62,52 %, у професійній, науковій і технічній діяльності – 40,43 %, у сфері операцій з нерухомістю – 24,82 % (рис. 3.21) [213].

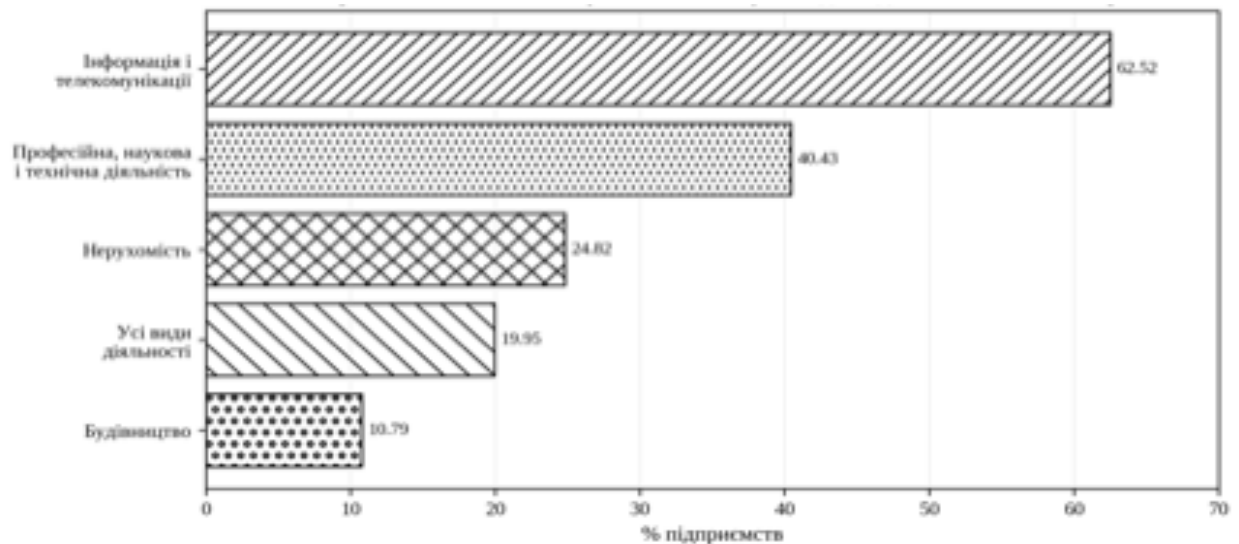


Рис. 3.21. Використання технологій штучного інтелекту за видами економічної діяльності в ЄС, 2025 рік

Джерело: побудовано автором за [213].

Низьке поширення штучного інтелекту в будівництві не слід інтерпретувати лише як технологічну інерцію. Проектні дані є гетерогенними, часто неструктурованими, розподіленими між організаціями та юридично значущими. Алгоритм, який використовується для прогнозу вартості, розпізнавання дефектів, оптимізації графіка або автоматизації перевірки, потребує репрезентативних даних, пояснюваності результату й контролю відповідальності.

За даними Eurostat, серед підприємств, які розглядали можливість використання штучного інтелекту, найпоширенішими бар'єрами були нестача компетентностей – 70,89 %, невизначеність правових наслідків – 52,52 % та занепокоєння щодо даних і приватності – 48,83 % [213]. Для будівельної екосистеми ці бар'єри взаємопов'язані: дефіцит компетентностей ускладнює оцінювання правових і модельних ризиків, а неузгодженість прав на дані обмежує створення навчальних вибірок.

Підтверджено обмежене використання штучного інтелекту в будівництві порівняно з інформаційно насиченими видами діяльності. Основним напрямом розвитку є формування якісних даних, компетентностей, правових правил і процедур експертної верифікації. [213].

Пріоритетні напрями застосування штучного інтелекту систематизовано в таблиці 3.23.

Таблиця 3.23

**Пріоритетні напрями використання штучного інтелекту в проєктах
біосферосумісного будівництва**

Напрямок	Цифровий вхід	Управлінський результат	Обов'язкове обмеження
Прогнозування вартості й строків	історичні кошториси, графіки, ризики, ринкові ціни	діапазон прогнозу, раннє виявлення перевищення, сценарна потреба в резерві	референтний клас, пояснюваність і незалежна перевірка
Перевірка BIM-моделі	геометрія, властивості, нормативні та інформаційні вимоги	виявлення колізій, неповноти й невідповідності	алгоритм не замінює авторську й технічну відповідальність
Комп'ютерний зір на майданчику	геоприв'язані фото, відео, модель і графік	оцінка прогресу, дефектів і порушень безпеки	законність збору даних, точність і процедура оскарження
Енергетична оптимізація	BMS, погода, тарифи, графік використання	прогноз споживання, керування режимами, виявлення аномалій	межі автоматичного впливу та безпечний ручний режим
Циркулярність і матеріальні потоки	DPP, матеріальні паспорти, IFC-властивості, дані демонтажу	оцінка придатності до повторного використання й логістики	верифікація складу, забруднення і технічного стану
Управління знаннями	договори, журнали рішень, нормативи, уроки проєктів	пошук прецедентів, рекомендації та прискорення підготовки рішень	контроль версій, джерел і заборона вигаданих посилань

Джерело: розроблено автором з урахуванням [42; 88; 197–199; 213].

Визначено сфери, у яких штучний інтелект може підтримувати прогнозування, перевірку та оптимізацію. Обов'язкові обмеження зберігають людську відповідальність за рішення та запобігають автоматизації недостовірних або юридично неприйнятних висновків.

BIM у пропонованій концепції розглядається не як окрема графічна технологія, а як режим управління інформацією. ISO 19650-1 встановлює концепти і принципи інформаційного менеджменту з використанням BIM; ISO 16739-1:2024 формалізує IFC як схему обміну даними між програмними системами будівництва та управління об'єктами. Їх поєднання дає змогу

відокремити інформаційні вимоги й дані від конкретного постачальника програмного забезпечення.

Аналіз BIM-адаптації в державах ЄС засвідчує різні інституційні траєкторії. Данія розвиває обов'язковість BIM у публічному секторі з 2007 року; Італія та Литва запровадили нормативні вимоги для публічних проєктів; Фінляндія та Естонія спираються на національні настанови; Німеччина – на BIM Stufenplan і федеральну координацію; Ірландія – на Build Digital Project [214]. Водночас частина держав перебуває на початковому або координаційному рівні.

Відмінність зрілої моделі полягає не в обов'язковості тривимірного моделювання як такої. Вона охоплює стандартизовані інформаційні вимоги замовника, спільне середовище даних, відкриті формати, національні класифікатори, підготовку кадрів, правила публічних закупівель і передавання інформації в експлуатацію. Тому для України доцільна поетапна інституціоналізація, за якої обов'язковість пов'язується з готовністю стандартів, шаблонів, цифрової інфраструктури та ринку.

Зрілість BIM визначається не лише нормативною обов'язковістю, а поєднанням інформаційного менеджменту, відкритих форматів, закупівельних правил, підготовки кадрів і експлуатаційної інтеграції. Для України цільовим орієнтиром є життєвоциклова модель. Порівняльні ознаки моделей інституціоналізації BIM наведено в таблиці Д.1 додатку Д.

Життєвоцикловий контур має забезпечувати передавання не всіх даних, створених на попередній фазі, а релевантного та верифікованого набору, необхідного наступному суб'єкту. На етапі ініціації домінують дані про потребу і цінність; у проєктуванні – геометрія, властивості, вимоги й варіанти; у закупівлі – обсяги, специфікації та критерії; у будівництві – фактичне виконання, якість і зміни; в експлуатації – параметри активів, режими, гарантії, енергія й технічне обслуговування.

Регламент ЄС 2024/3110 передбачає цифрову паспортну систему для будівельної продукції, сумісну з загальноєвропейським цифровим паспортом

продукту та інтероперабельну з BIM. Оновлена Директива ЄС 2024/1275 встановлює цифровий формат паспорта реновації та його зберігання або доступ через цифровий журнал будівлі. Ці інструменти формують європейську архітектуру, у якій інформація про продукт, будівлю, реновацію й експлуатацію стає пов'язаною.

Для України адаптація цієї логіки означає перехід від завершення цифрового сліду на дозвільному документі до формування цифрового паспорта об'єкта. Він має містити ідентифікатори компонентів, посилання на декларації характеристик і паспорти продукції, виконавчу модель, енергетичні дані, графік технічного обслуговування, гарантії, історію змін і сценарії повторного використання. Наскрізний рух релевантних даних упродовж життєвого циклу подано на рис. 3.22. Їх функціонування дає змогу оцінювати стратегічний результат упродовж експлуатації та повторного використання компонентів.



Рис. 3.22. Цифрова нитка життєвого циклу проєкту біосферосумісного будівництва

Джерело: розроблено автором з урахуванням [10; 133; 138; 215]

Розподіл цифрового інструментарію за фазами життєвого циклу будівельного проєкту представлено в таблиці 3.25.

Встановлено відповідність між управлінськими завданнями фаз, цифровими інструментами та даними, що передаються наступному суб'єкту. Підхід запобігає накопиченню надлишкової інформації й одночасно зменшує втрату критичних даних на межах життєвого циклу. Фазова диференціація цифрових засобів дає змогу визначати мінімально необхідний інформаційний склад для прийняття рішень на кожному наступному етапі та забезпечувати його доказову безперервність. У результаті формується наскрізний інформаційний контур, у якому цифрові дані не лише передаються між

учасниками, а зберігають семантичний зв'язок із відповідною стратегічною ціллю, управлінським рішенням і фактичним результатом проєкту.

Таблиця 3.24

Цифровий інструментарій за фазами життєвого циклу будівельного проєкту

Фаза	Стратегічне завдання	Цифровий інструмент	Дані, що передаються далі
Ініціація і портфель	обґрунтувати потребу, пріоритет і очікувану цінність	DREAM, ГІС, реєстри активів, сценарний аналіз	цілі, цільові групи, варіанти, обмеження, початкові КРІ
Обґрунтування	обрати життєвоциклово доцільний варіант	LCC, LCA, кліматичний скринінг, референтний прогноз	затверджений сценарій, припущення, резерви, інформаційні вимоги
Проектування	перетворити вимоги на координоване рішення	BIM, CDE, IFC, перевірка колізій, енергомодельовання	узгоджена модель, специфікації, обсяги, параметри результативності
Закупівля	забезпечити прозорий добір і збалансований контракт	Prozorro, е-контракт, модельні відомості обсягів	контрактні дані, гарантії, ризики, інформаційні обов'язки
Будівництво	контролювати строки, вартість, якість, ресурси та ESG	4D/5D BIM, мобільний контроль, IoT, комп'ютерний зір	фактична модель, акти, журнали, сертифікати, відхилення
Введення	підтвердити готовність і передати експлуатаційний набір	ЄДЕССБ, виконавча BIM-модель, цифровий паспорт активу	структуровані активи, гарантії, випробування, план обслуговування
Експлуатація	підтримувати результативність і планувати реновацію	BMS, DBL, цифровий двійник, паспорт реновації	фактична енергія, стан, ремонти, заміни, відхилення від проєкту
Демонтаж і повторне використання	мінімізувати відходи та зберегти цінність матеріалів	DPP, матеріальний паспорт, цифровий аудит компонентів	склад, стан, придатність, маршрут повторного використання або перероблення

Джерело: розроблено автором з урахуванням [10; 12; 21; 125; 129; 130; 150; 215].

Запропонована архітектура складається з чотирьох послідовних, але взаємопов'язаних шарів. Перший охоплює джерела первинних даних: державні реєстри, BIM, корпоративні ERP і CRM, системи закупівель, IoT, BMS, паспорти продукції й матеріалів. Другий забезпечує інтеграцію через API, відкриті формати, класифікатори, ідентифікатори, процедури

трансформації та валідації. Третій формує аналітичні результати: 4D/5D-моделі, LCA/LCC, KPI, сценарії та прогнози. Четвертий перетворює аналітику на портфельні, контрактні, ризикові та операційні рішення.

Над усіма шарами функціонує контур врядування даними. Він визначає власника даних, права створення і зміни, вимоги до повноти, періодичність актуалізації, правила доступу, архівування, кіберзахист і незалежну верифікацію. Без цього контуру інтеграція систем може збільшувати швидкість поширення помилки та створювати помилкову впевненість у точності. Інтероперабельність у запропонованій моделі має семантичний, технічний, організаційний і правовий виміри. Технічна можливість передати файл не гарантує однакового розуміння властивостей; однаковий класифікатор не визначає права змінювати запис; юридично значущий документ не обов'язково містить машиночитні дані. Отже, інтеграційний шар має об'єднувати формат, значення, відповідальність і доказовий статус.

Архітектуру інтероперабельного цифрового інструментарію представлено на рис. 3.23.

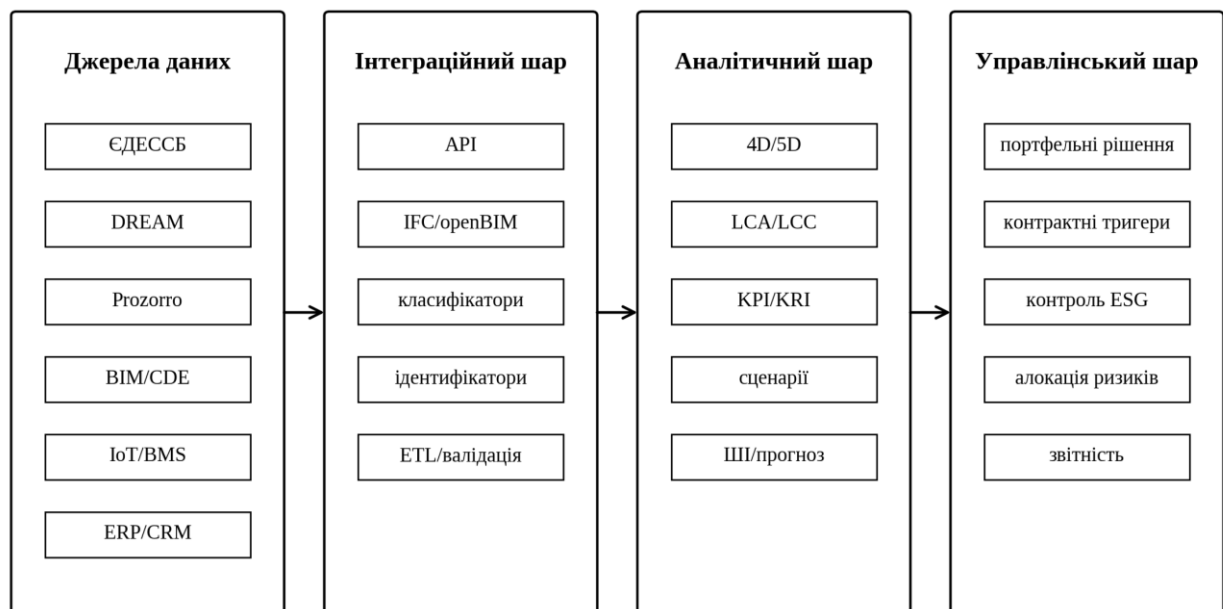


Рис. 3.23. Архітектура інтероперабельного цифрового інструментарію управління

Джерело: розроблено автором.

Виміри інтероперабельності цифрової проєктної екосистеми узагальнено в таблиці Д.2 Додатку Д. Мапування стратегічних цілей на цифрові інструменти та докази наведено в таблиці Д.3 Додатку Д.

Цифровий доказ не зводиться до наявності файлу. Він повинен мати ідентифікатор об'єкта, автора або джерело, дату й час, чинну версію, одиницю виміру, метод формування та зв'язок із рішенням. Для автоматично створених показників додатково необхідні версія алгоритму, вхідні дані та допустимі межі застосування.

Для діагностики цифрової зрілості проєктної екосистеми запропоновано п'ятирівневу модель цифрової зрілості. Фрагментарний рівень характеризується локальними файлами, ручним перенесенням даних і відсутністю єдиного джерела істини. Процесний рівень передбачає цифровізацію окремих функцій, але зберігає розриви між системами. Інтегрований рівень формує CDE, спільні ідентифікатори, класифікатори та API. Предиктивний рівень доповнює інтеграцію сценаріями, KRI, 4D/5D та алгоритмами раннього попередження. Екосистемний рівень забезпечує цифровий двійник, паспорти продуктів і будівель, автоматизовану верифікацію стратегічних результатів та передавання даних між проєктами. Запропонована градація дає змогу оцінювати цифрову зрілість не за фактом використання окремих технологій, а за рівнем інтегрованості даних, аналітичної спроможності та управлінського використання цифрових результатів. Кожний наступний рівень відображає ускладнення не лише технологічної архітектури, а й механізмів координації, відповідальності, доказовості та міжорганізаційної взаємодії. У такий спосіб модель може використовуватися як діагностичний інструмент для визначення поточного стану проєктної екосистеми та обґрунтування пріоритетних напрямів її цифрового розвитку.

Перехід між рівнями не є автоматичним накопиченням функцій. Він потребує зміни управлінських правил. Підприємство може використовувати BIM і залишатися на процесному рівні, якщо моделі не пов'язані з

корпоративними ресурсами й рішеннями. Водночас невеликий учасник може бути повноцінно інтегрованим через стандартизований інтерфейс, не маючи власної складної аналітичної інфраструктури (рис. 3.24).

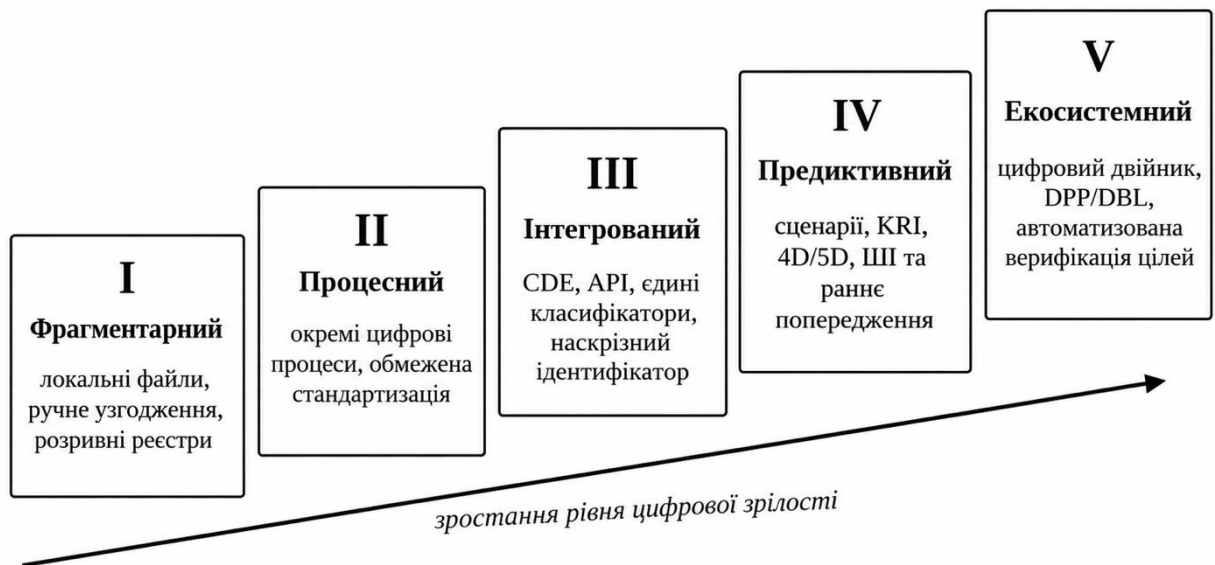


**Рис. 3.24. Рівні цифрової зрілості управління проєктом
біосферосумісного будівництва**

Джерело: розроблено автором.

Критерії визначення рівня цифрової зрілості систематизовано в таблиці 3.25. Таке структурування дає можливість відокремити технологічну наявність цифрових засобів від фактичної спроможності проєктної екосистеми використовувати їх для координації, прогнозування та прийняття рішень. Діагностика за окремими вимірами дозволяє встановити асиметрію цифрового розвитку, коли, наприклад, високий рівень автоматизації операцій не супроводжується належною інтеграцією даних, аналітичною спроможністю або формалізованим врядуванням. На цій основі ідентифікуються обмеження, усунення яких є необхідною умовою переходу до наступного рівня зрілості, а цифрові інвестиції можуть спрямовуватися на подолання конкретних функціональних розривів. Одночасно модель створює підґрунтя для зіставлення цифрової спроможності різних підприємств-стейкхолдерів та оцінювання їх готовності до участі в інтегрований проєктній екосистемі. Перехід до вищого рівня при цьому пов'язується не з формальним упровадженням нового програмного продукту, а з досягненням якісно нового

стану взаємодії даних, процесів, аналітики та управлінської відповідальності. У результаті діагностична рамка може використовуватися як інструмент обґрунтування послідовності цифрової трансформації та визначення пріоритетних напрямів розвитку інформаційно-управлінської спроможності проєкту біосферосумісного будівництва.

Таблиця 3.25

Критерії визначення рівня цифрової зрілості проєктної екосистеми

Критерій	I. Фрагментарний	II. Процесний	III. Інтегрований	IV. Предиктивний	V. Екосистемний
Дані	локальні файли	структуровані в окремих системах	єдина схема та ідентифікатори	потоків даних і контроль якості	життєвоцикловий граф даних
Інтеграція	ручне перенесення	періодичний імпорт/експорт	API, IFC, CDE	подієва інтеграція	міжорганізаційна інтероперабельність
Аналітика	описова	функціональні звіти	узгоджені KPI/KRI	прогноз і сценарії	автоматизована оптимізація цінності
Рішення	після факту	за регламентом процесу	за консолідованим станом	за ранніми сигналами	за життєвоцикловим і портфельним ефектом
Доказовість	неповна	журнали окремих систем	версійність і КЕП	відтворювані моделі та тригери	наскрізний цифровий паспорт результату
Врядування	неформальне	власники окремих систем	ролі, стандарти й права	модельний ризик і кіберстійкість	спільні правила всієї екосистеми

Джерело: розроблено автором.

Упровадження запропоновано здійснювати дев'ятьма взаємопов'язаними етапами. Вихідним є декомпозиція стратегічних цілей на вимірювані результати. Далі проводиться аудит даних і процесів, формуються інформаційні вимоги, обираються стандарти та архітектура, створюється пілотний контур, інтегруються системи, налаштовуються аналітичні правила і тригери, інституціоналізуються врядування та безпека, після чого валідується фактичний результат.

Пілотний контур має охоплювати не окрему функцію, а завершений управлінський цикл. Наприклад, для цілі скорочення життєвоциклової

вартості необхідно пов'язати інформаційні вимоги, ВІМ-обсяги, кошторис, графік, закупівельні ціни, фактичні платежі та експлуатаційний сценарій. Пілот, який завершується створенням моделі без перевірки рішення, не дає підстав оцінювати стратегічний ефект.

Валідація повинна порівнювати не лише технічну працездатність, а й зміни у строках ухвалення рішень, кількості інформаційних помилок, прогнозній точності, вартості координації, частці автоматично верифікованих даних і досягненні цільових ESG-параметрів. Негативний або нейтральний результат є підставою для перегляду процесу, інформаційної вимоги чи організаційного розподілу, а не автоматичного розширення технології (рис. 3.25).



Рис. 3.25. Механізм упровадження цифрового інструментарію реалізації стратегічних цілей

Джерело: розроблено автором.

Етапи впровадження цифрового інструментарію наведено в таблиці Д.4 додатку Д. Встановлено критерії переходу між етапами та перетворює впровадження на керований процес із доказовими контрольними точками. Масштабування допускається лише після підтвердження інтеоперабельності, своєчасності управлінських тригерів і перевищення ефекту над сукупними витратами.

Проведене узагальнення дає підстави розглядати цифровий інструментарій не як сукупність відокремлених технологічних рішень, а як керовану архітектуру реалізації стратегічних цілей проєкту біосферосумісного будівництва, у якій дані, моделі, аналітичні процедури, цифрові докази та управлінські повноваження поєднані наскрізною логікою життєвого циклу. Сформований підхід забезпечує перехід від фрагментарної автоматизації до інтеоперабельної проєктної екосистеми, де кожна стратегічна ціль операціоналізується через відповідний показник, джерело даних, цифровий інструмент, контрольну подію та верифікований результат. Запропонована п'ятирівнева модель цифрової зрілості дає змогу діагностувати не лише поточний стан цифровізації підприємств-стейкхолдерів, а й структурні обмеження їх переходу до інтегрованого, предиктивного та екосистемного управління. Практична реалізація сформованих положень орієнтована на скорочення інформаційних розривів, дублювання систем і трансакційних витрат координації, підвищення якості даних, своєчасності управлінських реакцій та доказовості економічних, екологічних і соціальних результатів. У такий спосіб цифровізація набуває властивостей економіко-управлінського механізму формування цінності, стійкості та біосферосумісної результативності проєкту, а сформовані цифрові параметри створюють інформаційно-аналітичне підґрунтя для їх подальшого формалізованого оцінювання й інтеграції в економіко-цифрові моделі управління підприємствами-стейкхолдерами.

Висновки розділу 3

1. Інституціоналізацію ESG-принципів обґрунтовано як процес перетворення зовнішніх екологічних, соціальних і управлінських вимог на відтворювані правила економіко-цифрового управління. Його структурну основу становить взаємодія зовнішнього інституційного, внутрішнього корпоративного та цифрового контурів. Розрив між ними формує відповідно формальний комплаєнс, декларативне корпоративне врядування або технократичну цифровізацію без зміни поведінки.

2. Набули подальшого розвитку принципи каузальної операціоналізації інструментально-діагностичного й аналітично-інтерпретаційного контурів за послідовністю «вимога – параметрична директива – фактичні дані – ризик – управлінське рішення – верифікований результат». Параметрична директива визначає метрику, ціль, поріг або обов’язкову умову, придатну до нормування, нечіткої інтерпретації, сценарної зміни та автоматизованої перевірки.

3. Розроблено дев’ятиетапний механізм інтеграції ESG-вимог, який охоплює ідентифікацію, суттєвість, мапування на життєвий цикл, розподіл відповідальності, формування показників, організацію даних, інтеграцію у рішення, верифікацію та розкриття із зворотним зв’язком. Механізм має рекурсивний характер і створює інституційну пам’ять економіко-цифрової моделі.

4. Довеєно, що ризикове поле будівельних проєктів України формується під одночасним впливом масштабних потреб відновлення, секторальної й територіальної концентрації, дефіциту фінансування, оперативних обмежень підприємств і дефектів міжорганізаційної координації. Випереджальне зростання втрат порівняно з прямою шкодою підсилює значення строків, безперервності послуг і функціонального результату.

5. Обґрунтовано методологічне розмежування передачі й алокації ризику. Передача змінює суб’єкта договірної або фінансового наслідку, тоді

як адаптивна алокація розподіляє здатність запобігати події, формувати дані, ухвалювати рішення, виконувати захід, фінансувати залишковий ризик і забезпечувати зовнішню комунікацію.

6. Удосконалено методологічний підхід до адаптивної алокації через поєднання інституційно-контрактного, економіко-діагностичного, цифрово-аналітичного та екосистемно-поведінкового рівнів. Вісім критеріїв – контрольованість джерела, доступ до даних, спроможність мінімізувати наслідки, правова визначеність, економічна мотивація, життєвоцикловий вплив, соціальна легітимність і цифрова перевірюваність – застосовуються окремо до п'яти функціональних ролей.

7. Розроблено механізм дев'яти послідовних процедур від ідентифікації та квантифікації до контрактно-цифрового закріплення, моніторингу, переалюкації й організаційного навчання. Цифровий паспорт ризику фіксує причинний опис, KRI, рольовий вектор, резерв, докази та тригери, забезпечуючи відтворюваність рішення протягом життєвого циклу.

8. Проведений аналіз підтвердив, що Україна сформувала розвинений реєстровий та портфельний цифровий контур будівництва. Масштаб ЄДЕССБ, автоматизація реєстрацій, інтеграція з адресними й майновими реєстрами, розвиток DREAM та цифровізація управління публічними інвестиціями створюють інституційні передумови прозорості й простежуваності. Водночас основним обмеженням залишається розрив між державними реєстрами, корпоративними системами, BIM-моделями, закупівлями, фактичним виконанням та експлуатаційними даними.

9. Порівняльна статистика ЄС виявила, що будівництво відстає від середнього рівня підприємств за ERP, CRM, BI та штучним інтелектом. Найглибшим є дефіцит аналітичної спроможності та масштабна асиметрія між малими і великими підприємствами. Звідси випливає, що цифрова трансформація проєктної екосистеми не може ґрунтуватися лише на вимогах до окремих підприємств. Необхідна спільна інфраструктура, відкриті стандарти, доступні інтерфейси й диференційовані інформаційні обов'язки.

10. Удосконалено функціональну модель цифрового забезпечення стратегічних цілей шляхом формування цифрового ядра на основі спільного середовища даних та інформаційної моделі об'єкта і поєднання функцій моделювання, поточного моніторингу, цифрового двійника, аналітики й прогнозування, оцінювання життєвого циклу, багатокритеріального вибору та управлінського контролю. Модель розгорнуто у чотиришарову архітектоніку джерел, інтеграції, аналітики й рішень із наскрізним врядуванням даними, життєвоцикловою цифровою ниткою, п'ятирівневою моделлю зрілості та дев'ятиетапним механізмом упровадження.

РОЗДІЛ 4

НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ФОРМУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЕКОНОМІКО-ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВАМИ-СТЕЙКХОЛДЕРАМИ

4.1. Формування архітектоніки багаторівневої нечітко-логічної моделі IDEM оцінювання економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами

Сучасний розвиток будівельної галузі характеризується одночасним впливом процесів цифрової трансформації, екологізації виробництва, зростання вимог до сталого розвитку, а також необхідністю забезпечення ефективної взаємодії між усіма учасниками будівельного проєкту. Традиційні підходи до управління будівельними підприємствами переважно орієнтувалися на фінансово-економічні показники та показники виробничої результативності, однак у сучасних умовах цього вже недостатньо для забезпечення довгострокової конкурентоспроможності підприємства [28, 29, 220].

Поступове впровадження концепцій ESG, Industry 4.0, BIM-орієнтованого управління, Digital Twin, Smart Construction та біосферосумісного будівництва призводить до необхідності створення нових моделей управління, здатних враховувати одночасно економічні, цифрові, екологічні, соціальні та організаційні аспекти функціонування підприємства. Особливу складність становить те, що значна частина таких параметрів має якісний, слабоструктурований або нечіткий характер, що ускладнює використання виключно класичних економіко-математичних методів.

У зв'язку з цим доцільним є використання апарату нечіткої логіки (Fuzzy Logic), який дозволяє формалізувати складні управлінські процеси, що характеризуються невизначеністю, неповнотою інформації, експертними оцінками та високим рівнем динамічності зовнішнього середовища [216].

Нечітко-логічний підхід забезпечує можливість інтеграції кількісних та якісних характеристик у межах єдиної моделі прийняття рішень, що є особливо важливим для систем управління будівельними підприємствами в умовах цифрової економіки та біосферосумісного розвитку [172, 219].

З огляду на багатофакторність та ієрархічність процесів управління будівельними підприємствами, у роботі запропоновано багаторівневу нечітко-логічну модель оцінювання ефективності економіко-цифрового управління, основу якої становить інтегральний показник IDEM (Індекс інтегрованого цифрового економічного управління, англ. Integrated Digital-Economic Management Index). Запропонований індекс відображає узагальнений рівень ефективності функціонування підприємства у контексті цифрової трансформації, екологічної відповідальності, економічної стійкості та стейкхолдерно-орієнтованого управління.

Архітектура моделі побудована за дворівневим принципом [218, 219]. На нижньому рівні функціонують окремі нечітко-логічні підсистеми, кожна з яких відповідає за оцінювання окремого функціонального напрямку діяльності підприємства. Результатом роботи кожної підсистеми є інтегрований вихідний показник, який надалі використовується як вхідна змінна верхнього рівня моделі. На верхньому рівні моделі здійснюється інтеграція результатів роботи всіх функціональних підсистем з метою формування фінального інтегрального показника IDEM. Такий підхід дозволяє забезпечити як деталізоване оцінювання окремих складових діяльності підприємства, так і комплексне визначення загального рівня ефективності економіко-цифрового управління (рис. 4.1).

До складу верхнього рівня моделі включено п'ять основних інтегральних компонентів:

- Out1 – економічна результативність підприємства;
- Out2 – цифрова зрілість управління;
- Out3 – екологічна та біосферосумісна ефективність;
- Out4 – стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість;

– Out5 – організаційно-інноваційна стійкість.



Рис. 4.1. Архітектура багаторівневої нечітко-логічної моделі оцінювання ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами

Джерело: розроблено автором.

Однією з ключових складових запропонованої багаторівневої нечітко-логічної моделі є компонент Out1 «Економічна результативність підприємства». Включення даного компонента до структури моделі обумовлене тим, що саме економічна спроможність підприємства формує базову основу для реалізації будь-яких процесів цифрової трансформації, екологізації виробництва та впровадження інноваційних управлінських рішень.

У сучасних умовах будівельна галузь функціонує в середовищі високої економічної нестабільності, зростання вартості ресурсів, посилення конкуренції, швидких технологічних змін та значного рівня ризиків. За таких умов економічна результативність перестає розглядатися виключно як показник прибутковості підприємства. Натомість вона набуває комплексного характеру та охоплює здатність підприємства забезпечувати фінансову стійкість, ефективно використовувати ресурси, підтримувати інвестиційну привабливість і зберігати конкурентні позиції в довгостроковій перспективі.

Особливого значення економічна результативність набуває саме в контексті біосферосумісного будівництва. Реалізація екологічно орієнтованих та цифрово інтегрованих будівельних проєктів потребує значних фінансових ресурсів, модернізації виробничої бази, впровадження нових технологій, підготовки персоналу та перебудови управлінських процесів. У зв'язку з цим недостатній рівень економічної стійкості підприємства може стати критичним бар'єром для впровадження принципів сталого розвитку та цифрової трансформації.

Включення цього компонента на верхній рівень моделі також пов'язане з тим, що економічна результативність безпосередньо впливає на всі інші функціональні блоки системи. Зокрема, рівень фінансово-економічної спроможності підприємства визначає можливості інвестування у цифрові технології та BIM-системи; впровадження ESG-орієнтованих рішень; реалізації програм екологічної модернізації; розвитку людського капіталу; підтримання інноваційної активності; забезпечення стійкості до кризових явищ.

Таким чином, економічна результативність у межах запропонованої моделі розглядається не лише як окремий функціональний параметр, а як системоутворюючий елемент, який значною мірою визначає здатність підприємства до адаптації та розвитку в умовах цифрової економіки. Важливою особливістю даного компонента є також його інтегративний характер. На відміну від класичних підходів, де економічна ефективність часто оцінюється через один або декілька фінансових показників, у межах нечітко-логічної моделі економічна результативність розглядається як багатовимірна категорія. Такий підхід дозволяє враховувати не лише формальні фінансові результати діяльності підприємства, а й його потенціал для розвитку, стабільність функціонування та здатність забезпечувати довгострокову економічну стійкість.

Крім того, саме економічний блок є одним із найбільш придатних для застосування апарату нечіткої логіки. Значна частина характеристик

економічного стану підприємства має нечіткий або інтервальний характер і залежить від експертної інтерпретації. Наприклад, такі категорії, як «висока інвестиційна привабливість», «достатня фінансова стійкість» або «ефективне використання ресурсів», складно формалізувати виключно за допомогою жорстких математичних меж. Саме тому використання нечіткого підходу дає змогу забезпечити більш гнучке та реалістичне оцінювання економічного стану підприємства.

Необхідність включення компонента економічної результативності також підтверджується сучасними тенденціями розвитку будівельного ринку. У міжнародній практиці цифрова трансформація будівництва дедалі частіше розглядається крізь призму економічної доцільності та ефективності інвестицій у цифрові технології. Водночас екологічні та ESG-орієнтовані рішення також оцінюються не лише з позицій екологічного ефекту, але й через їх вплив на економічну стабільність підприємства, інвестиційну привабливість та конкурентоспроможність.

У межах запропонованої архітектури моделі компонент Out1 виступає окремою нечітко-логічною підсистемою нижнього рівня, яка формує інтегральну оцінку економічної результативності підприємства. Надалі отримане значення використовується як одна з ключових вхідних змінних верхнього рівня моделі для формування фінального інтегрального індексу IDEM. Компонент «Економічна результативність підприємства» є критично важливим елементом запропонованої системи економіко-цифрового управління, оскільки саме він забезпечує основу для реалізації процесів цифрової трансформації, екологічної модернізації та сталого розвитку будівельного підприємства в умовах сучасної цифрової економіки.

Другим ключовим компонентом верхнього рівня запропонованої багаторівневої нечітко-логічної моделі є Out2 «Цифрова зрілість управління». Включення цього компонента до структури моделі обумовлене глобальними процесами цифрової трансформації будівельної галузі, які суттєво змінюють підходи до управління підприємствами, організації будівельного виробництва,

прийняття рішень та координації діяльності стейкхолдерів. У сучасних умовах цифровізація перестає бути лише допоміжним елементом оптимізації окремих бізнес-процесів. Вона поступово перетворюється на один із визначальних факторів конкурентоспроможності підприємства та його здатності ефективно функціонувати в умовах динамічного зовнішнього середовища. Для будівельної галузі це має особливе значення, оскільки будівельні проекти характеризуються високим рівнем складності, значною кількістю учасників, великими обсягами інформації, тривалими життєвими циклами та необхідністю оперативного управління змінами.

Саме тому цифрова зрілість управління в межах даного дослідження розглядається не лише як рівень використання окремих цифрових технологій, а й як комплексна характеристика здатності підприємства інтегрувати цифрові рішення в усі рівні управлінської діяльності. Такий підхід охоплює не тільки технічний аспект цифровізації, але й організаційні, інформаційні, управлінські та компетентнісні складові цифрової трансформації.

Особливого значення цифрова зрілість набуває в контексті розвитку концепцій Industry 4.0, Smart Construction, BIM-oriented management, Digital Twin та Data-driven management. Використання цифрових платформ, систем інформаційного моделювання, хмарних середовищ, інтернету речей, Big Data та штучного інтелекту дає змогу суттєво підвищити ефективність планування, моніторингу та координації будівельних процесів. У результаті цифровізація починає безпосередньо впливати на економічні, екологічні та соціальні результати діяльності підприємства.

Включення компонента «Цифрова зрілість управління» до верхнього рівня моделі також пояснюється тим, що саме рівень цифрової інтеграції визначає здатність підприємства адаптуватися до сучасних вимог ринку та реалізовувати принципи біосферосумісного будівництва. Значна частина сучасних екологічно орієнтованих управлінських рішень базується саме на цифрових технологіях, які забезпечують:

- моніторинг використання ресурсів;

- контроль екологічних параметрів;
- прогнозування ризиків;
- аналіз життєвого циклу об'єкта;
- автоматизацію управлінських процесів;
- інтеграцію даних між усіма учасниками проєкту.

Фактично цифрова зрілість виступає одним із ключових каталізаторів реалізації концепції сталого та біосферосумісного розвитку в будівництві.

Крім того, високий рівень цифрової зрілості забезпечує підвищення прозорості управлінських процесів, оперативності ухвалення рішень та якості комунікації між стейкхолдерами. Це особливо важливо для великих будівельних проєктів, де недостатній рівень інформаційної взаємодії часто призводить до перевитрат ресурсів, помилок у координації, затримок реалізації проєктів та зростання ризиків.

У межах запропонованої моделі цифрова зрілість управління розглядається як багатовимірна категорія, яка поєднує технологічні, організаційні та управлінські складові. Такий підхід дозволяє уникнути спрощеного трактування цифровізації виключно через рівень використання програмного забезпечення або окремих цифрових інструментів. Натомість оцінюється загальна готовність підприємства до функціонування в умовах цифрової економіки та його здатність формувати інтегроване цифрове середовище управління.

Доцільність використання саме нечітко-логічного підходу для оцінювання цифрової зрілості пояснюється складністю формалізації багатьох характеристик цифрової трансформації. Значна частина параметрів має якісний характер і залежить від експертної оцінки. Наприклад, такі поняття, як «високий рівень цифрової інтеграції», «достатня цифрова компетентність» або «ефективне цифрове управління даними», складно описати виключно за допомогою жорстких кількісних меж. У цьому випадку апарат нечіткої логіки дозволяє формувати більш гнучкі та адаптивні моделі оцінювання. Важливо також зазначити, що рівень цифрової зрілості підприємства безпосередньо

впливає на інші функціональні компоненти моделі. Зокрема, цифровізація сприяє: підвищенню економічної ефективності, покращенню екологічного моніторингу, підвищенню прозорості взаємодії зі стейкхолдерами, посиленню адаптивності організаційної структури та підвищенню стійкості до кризових ситуацій.

Цифрова зрілість управління в межах даного дослідження виступає не лише окремою характеристикою діяльності підприємства, а й одним із системоутворюючих елементів сучасної моделі управління будівельними підприємствами. У структурі запропонованої нечітко-логічної системи компонент Out2 реалізується у вигляді окремої підсистеми нижнього рівня, результатом роботи якої є інтегральна оцінка цифрової зрілості управління підприємством. Отримане значення надалі використовується як одна з ключових вхідних змінних верхнього рівня моделі для формування фінального інтегрального індексу IDEM.

Третім ключовим компонентом верхнього рівня запропонованої багаторівневої нечітко-логічної моделі є Out3 «Екологічна та біосферосумісна ефективність». Включення даного компонента до структури моделі обумовлене сучасними глобальними тенденціями розвитку будівельної галузі, пов'язаними із переходом до концепції сталого розвитку, декарбонізації економіки, раціонального використання природних ресурсів та мінімізації негативного впливу будівельної діяльності на навколишнє середовище.

Будівельна галузь традиційно належить до найбільш ресурсоємних секторів економіки. Значне споживання енергії, використання великої кількості природних ресурсів, утворення будівельних відходів, викиди парникових газів та вплив на екосистеми формують необхідність перегляду класичних підходів до організації будівельного виробництва. У зв'язку з цим у сучасній науковій та практичній площині дедалі більшого значення набуває концепція біосферосумісного будівництва, яка передбачає гармонізацію будівельної діяльності із природним середовищем та принципами екологічної збалансованості.

У межах даного дослідження екологічна та біосферосумісна ефективність розглядається як комплексна характеристика здатності підприємства забезпечувати реалізацію будівельної діяльності з урахуванням екологічних обмежень, принципів раціонального природокористування та вимог ESG-орієнтованого розвитку. При цьому йдеться не лише про дотримання формальних екологічних нормативів, а й про формування системного підходу до управління екологічними аспектами діяльності підприємства протягом усього життєвого циклу будівельного проєкту.

Включення компонента Out3 до верхнього рівня моделі пояснюється також тим, що екологічна ефективність поступово перетворюється на один із ключових факторів конкурентоспроможності будівельних підприємств. Сучасні інвестори, міжнародні фінансові організації, державні регулятори та суспільство дедалі більше орієнтуються на екологічні критерії під час оцінювання діяльності компаній. У багатьох країнах світу рівень екологічної відповідальності підприємства вже безпосередньо впливає на:

- доступ до інвестиційних ресурсів;
- участь у міжнародних проєктах;
- можливість отримання сертифікації;
- позиціонування на ринку;
- рівень довіри з боку стейкхолдерів.

Особливого значення екологічна складова набуває саме у контексті цифрової трансформації будівельної галузі. Сучасні цифрові технології, зокрема BIM, IoT, Big Data, Digital Twin та системи Life Cycle Assessment, створюють можливість переходу до більш ефективного екологічного управління. Використання таких інструментів дозволяє: прогнозувати екологічний вплив проєктів, оптимізувати використання матеріальних ресурсів, знижувати енергоспоживання, контролювати викиди та відходи, оцінювати екологічні ризики, а також формувати сценарії сталого розвитку підприємства. Таким чином, екологічна та біосферосумісна ефективність у межах запропонованої моделі тісно інтегрується з цифровою складовою

управління та виступає одним із базових елементів сучасної економіко-цифрової системи управління будівельним підприємством.

Доцільність використання саме нечітко-логічного підходу для оцінювання даного компонента пояснюється високим рівнем складності та багатофакторності екологічних процесів. Значна частина параметрів екологічної ефективності характеризується невизначеністю, нечіткістю меж та залежністю від експертної інтерпретації. Наприклад, такі категорії, як «високий рівень екологічної відповідальності», «достатня біосферосумісність» або «ефективне екологічне управління», складно описати виключно за допомогою жорстких кількісних показників. У цьому випадку апарат нечіткої логіки дозволяє забезпечити більш адаптивне та реалістичне моделювання складних екологічних взаємозв'язків.

Також важливо зазначити, що екологічна ефективність безпосередньо впливає на інші компоненти верхнього рівня моделі. Зокрема: підвищення екологічної відповідальності сприяє зростанню інвестиційної привабливості підприємства; цифровізація екологічного моніторингу підвищує загальний рівень цифрової зрілості управління; екологічно орієнтована корпоративна політика позитивно впливає на взаємодію зі стейкхолдерами; впровадження екологічних інновацій підсилює організаційно-інноваційну стійкість підприємства. Отже, компонент Out3 виконує не лише функцію оцінювання екологічного стану підприємства, але й виступає одним із інтегруючих елементів усієї системи економіко-цифрового управління.

У структурі запропонованої моделі компонент «Екологічна та біосферосумісна ефективність» реалізується у вигляді окремої нечітко-логічної підсистеми нижнього рівня, результатом роботи якої є інтегральна оцінка екологічної ефективності підприємства. Надалі отримане значення використовується як одна з вхідних змінних верхнього рівня під час формування фінального інтегрального індексу IDEM.

Четвертим компонентом верхнього рівня запропонованої багаторівневої нечітко-логічної моделі є Out4 «Стейкхолдерно-людиноцентрична

орієнтованість». Включення даного компонента до структури моделі обумовлене сучасною трансформацією підходів до управління будівельними підприємствами, в межах якої людина, соціальна відповідальність та взаємодія із зацікавленими сторонами поступово стають одним із ключових факторів забезпечення ефективності та стійкості розвитку підприємства.

Традиційні моделі управління в будівельній галузі тривалий час орієнтувалися переважно на виробничо-економічні показники, тоді як соціальні аспекти, якість взаємодії зі стейкхолдерами та людиноцентричні підходи розглядалися як другорядні елементи управління. Однак сучасні умови функціонування будівельного ринку характеризуються високим рівнем соціальної динаміки, зростанням вимог до прозорості управлінських процесів, посиленням ролі корпоративної соціальної відповідальності та необхідністю формування довгострокових партнерських взаємовідносин між усіма учасниками будівельного процесу.

У контексті реалізації принципів сталого розвитку та ESG-орієнтації особливого значення набуває саме стейкхолдерний підхід до управління. Будівельний проєкт є складною багатосуб'єктною системою, у межах якої взаємодіють інвестори, замовники, підрядники, проєктні організації, органи державного управління, місцеві громади, працівники, постачальники та кінцеві користувачі об'єкта. Ефективність реалізації будівельного проєкту значною мірою залежить від якості координації інтересів усіх зазначених груп та здатності підприємства забезпечувати ефективну комунікацію між ними.

Саме тому у межах даного дослідження стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість розглядається як комплексна характеристика здатності підприємства формувати ефективне соціальне середовище управління, забезпечувати збалансовану взаємодію із зацікавленими сторонами та підтримувати високий рівень соціальної відповідальності у процесі реалізації будівельних проєктів. Особливого значення людиноцентричний підхід набуває в умовах цифрової трансформації будівельної галузі. Незважаючи на активне впровадження цифрових

технологій, автоматизації та штучного інтелекту, ключовим елементом будь-якої системи управління залишається людина. Ефективність цифрових рішень значною мірою залежить від рівня підготовки персоналу, якості організаційної комунікації, готовності працівників до змін та здатності підприємства формувати сприятливе середовище для адаптації до нових умов функціонування.

Крім того, сучасні цифрові екосистеми будівельних проєктів суттєво посилюють необхідність координації між стейкхолдерами. Інтеграція BIM-технологій, цифрових платформ управління, систем спільного доступу до даних та інструментів цифрової взаємодії потребує високого рівня довіри, прозорості та узгодженості між усіма учасниками проєкту. У зв'язку з цим рівень стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості безпосередньо впливає на ефективність функціонування всієї цифрової системи управління підприємством.

Включення даного компонента до верхнього рівня моделі пояснюється також тим, що соціальні та людиноцентричні аспекти дедалі більше впливають на загальний рівень конкурентоспроможності підприємства. У міжнародній практиці під час оцінювання діяльності компаній все більшу роль відіграють:

- рівень корпоративної соціальної відповідальності;
- безпека та умови праці;
- якість взаємодії з персоналом;
- прозорість комунікації;
- соціальна репутація підприємства;
- рівень задоволеності стейкхолдерів.

Наявність ефективної системи взаємодії зі стейкхолдерами сприяє підвищенню стійкості підприємства до конфліктів, покращенню процесів прийняття рішень та зниженню рівня організаційних ризиків під час реалізації будівельних проєктів. Важливою особливістю даного компонента є значний рівень невизначеності та складності формалізації більшості його

характеристик. Значна частина соціальних і поведінкових параметрів має якісний характер та залежить від експертної оцінки. Наприклад, такі поняття, як «високий рівень довіри», «ефективна взаємодія зі стейкхолдерами» або «достатній рівень людиноцентричності в управлінні», складно описати виключно за допомогою класичних кількісних методів. Саме тому використання апарату нечіткої логіки є доцільним для формування більш гнучкої системи оцінювання соціально-управлінських процесів.

У межах запропонованої архітектури моделі компонент Out4 реалізується у вигляді окремої нечітко-логічної підсистеми нижнього рівня, результатом роботи якої є інтегральна оцінка рівня стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості підприємства. Надалі отримане значення використовується як одна з ключових вхідних змінних верхнього рівня для формування інтегрального індексу IDEM. Компонент «Стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість» є важливою складовою запропонованої системи економіко-цифрового управління, оскільки саме він забезпечує інтеграцію соціальних, поведінкових та комунікаційних аспектів у загальну систему оцінювання ефективності функціонування будівельного підприємства в умовах цифрової економіки та біосферосумісного розвитку.

П'ятим компонентом верхнього рівня запропонованої багаторівневої нечітко-логічної моделі є Out5 «Організаційно-інноваційна стійкість». Включення цього компонента до структури моделі обумовлене необхідністю врахування здатності будівельного підприємства адаптуватися до змін зовнішнього середовища, забезпечувати безперервний розвиток, підтримувати інноваційну активність та зберігати стійкість функціонування в умовах високої турбулентності сучасної економіки. Сучасна будівельна галузь функціонує в умовах постійних змін, які охоплюють економічні, технологічні, екологічні, політичні та соціальні процеси. Зростання конкуренції, швидка цифровізація, посилення екологічних вимог, нестабільність ринків, дефіцит ресурсів та геополітичні ризики формують середовище, в якому здатність

підприємства швидко адаптуватися до нових умов стає одним із ключових факторів його довгострокової життєздатності.

У зв'язку з цим організаційно-інноваційна стійкість у межах даного дослідження розглядається як комплексна характеристика, що відображає здатність підприємства:

- забезпечувати гнучкість управлінської системи;
- підтримувати інноваційний розвиток;
- ефективно реагувати на кризові ситуації;
- адаптувати організаційну структуру до нових умов функціонування;
- забезпечувати стабільність реалізації стратегічних цілей.

Особливого значення цей компонент набуває в умовах цифрової трансформації будівельної галузі. Впровадження BIM-технологій, систем цифрового моніторингу, платформ управління даними, автоматизації процесів та штучного інтелекту потребує не лише технічної модернізації, а й суттєвої трансформації внутрішньої організаційної структури підприємства. У багатьох випадках саме недостатня адаптивність управлінської системи стає основною причиною низької ефективності цифрових реформ. Тому у межах запропонованої моделі організаційно-інноваційна стійкість розглядається як один із базових системоутворюючих елементів ефективного економіко-цифрового управління. Фактично даний компонент виконує роль інтеграційного механізму, який забезпечує здатність підприємства підтримувати баланс між економічною результативністю, цифровою трансформацією, екологічною відповідальністю та соціальною орієнтованістю. Включення компонента Out5 до верхнього рівня моделі пояснюється також тим, що сучасне будівельне підприємство функціонує не як статична виробнича структура, а як динамічна організаційна система, що постійно взаємодіє із зовнішнім середовищем. У таких умовах важливого значення набуває саме здатність підприємства до: організаційного навчання;

управління змінами; швидкого впровадження інновацій; адаптації до цифрових трансформацій; реагування на ризики та кризові явища.

Крім того, організаційно-інноваційна стійкість безпосередньо пов'язана із забезпеченням конкурентоспроможності підприємства в довгостроковій перспективі. Підприємства, які характеризуються високою адаптивністю та інноваційною активністю, значно швидше впроваджують нові технології, ефективніше реагують на зміни ринку та мають вищий потенціал до реалізації складних інноваційних проєктів.

Особливої актуальності даний компонент набуває в умовах нестабільного зовнішнього середовища та кризових процесів. Будівельна галузь є надзвичайно чутливою до економічних коливань, змін нормативно-правового середовища, перебоїв у ланцюгах постачання, коливань вартості ресурсів та інвестиційної активності. У зв'язку з цим стійкість підприємства до кризових впливів стає критично важливою умовою підтримання безперервності функціонування та забезпечення реалізації стратегічних програм розвитку.

У межах даного дослідження організаційно-інноваційна стійкість також розглядається як важлива передумова ефективного впровадження концепції біосферосумісного будівництва. Реалізація екологічно орієнтованих та цифрово інтегрованих проєктів потребує високого рівня організаційної координації, здатності до міжфункціональної взаємодії та постійного оновлення управлінських підходів. Саме тому підприємство повинно мати достатній рівень гнучкості та інноваційної спроможності для забезпечення ефективного переходу до нових моделей управління.

Доцільність використання нечітко-логічного підходу для оцінювання цього компонента пояснюється складністю формалізації багатьох характеристик організаційної стійкості та інноваційної активності. Значна частина відповідних параметрів має якісний характер і залежить від експертного оцінювання. Наприклад, такі поняття, як «висока адаптивність», «достатня стратегічна гнучкість» або «ефективна інноваційна активність»,

складно оцінити виключно за допомогою жорстких кількісних критеріїв. Саме тому використання fuzzy-підходу дозволяє більш адекватно моделювати складні організаційно-управлінські процеси.

У структурі запропонованої моделі компонент Out5 реалізується у вигляді окремої нечітко-логічної підсистеми нижнього рівня, результатом роботи якої є інтегральна оцінка рівня організаційно-інноваційної стійкості підприємства. Надалі отримане значення використовується як одна з ключових вхідних змінних верхнього рівня моделі для формування фінального інтегрального індексу IDEM.

Фінальним виходом моделі є інтегральний індекс IDEM, який формується шляхом агрегування зазначених компонентів у межах верхнього рівня нечітко-логічної системи. Значення індексу IDEM дозволяє комплексно оцінити рівень ефективності економіко-цифрового управління будівельним підприємством у контексті біосферосумісного виробництва та сталого розвитку.

Особливістю запропонованої моделі є її адаптивність та можливість подальшого масштабування. Залежно від специфіки підприємства або умов реалізації будівельного проєкту структуру моделі може бути доповнено новими змінними, критеріями або функціональними блоками. Крім того, використання нечіткої логіки забезпечує можливість інтеграції експертних оцінок, статистичних даних, цифрових індикаторів та сценарних параметрів у межах єдиного аналітичного середовища.

Запропонований підхід створює підґрунтя для подальшого розвитку гібридних моделей підтримки прийняття управлінських рішень, зокрема шляхом інтеграції нечіткої логіки з методами Monte Carlo, штучними нейронними мережами, сценарним аналізом, багатокритеріальними методами прийняття рішень та цифровими системами моніторингу будівельних проєктів.

У межах запропонованої багаторівневої нечітко-логічної моделі підсистема «Економічна результативність підприємства» (Out1) призначена

для комплексного оцінювання фінансово-економічної спроможності будівельного підприємства в умовах цифрової економіки та біосферосумісного розвитку. Дана підсистема функціонує на нижньому рівні моделі та формує інтегральний вихідний показник Out1, який у подальшому використовується як одна з вхідних змінних верхнього рівня під час розрахунку фінального індексу IDEM.

Архітектура підсистеми побудована на основі чотирьох вхідних змінних, які характеризують ключові аспекти економічної діяльності підприємства:

- In1 – рентабельність операційної діяльності;
- In2 – фінансова стійкість підприємства;
- In3 – ресурсно-економічна ефективність;
- In4 – інвестиційно-економічна привабливість.

Вибір саме цих змінних зумовлений необхідністю забезпечення комплексного оцінювання не лише поточного фінансового стану підприємства, а й його здатності до стабільного функціонування, адаптації до ринкових змін і реалізації довгострокових стратегічних цілей.

Вхідна змінна In1 – Рентабельність операційної діяльності характеризує рівень ефективності основної операційної діяльності підприємства та відображає здатність генерувати прибуток у процесі реалізації будівельних робіт і надання послуг. Даний показник є одним із базових індикаторів економічної результативності, оскільки дозволяє оцінити ефективність функціонування підприємства незалежно від зовнішніх фінансових або інвестиційних факторів.

Для розрахунку показника використовується коефіцієнт операційної рентабельності:

$$R_{op} = \frac{OP}{OR} \times 100\% \quad (4.1)$$

де: R_{op} – рентабельність операційної діяльності; OP – операційний прибуток підприємства; OR – операційні доходи підприємства.

У межах нечітко-логічної моделі значення показника надалі нормалізується до інтервалу $[0;1]$, що забезпечує можливість інтеграції змінної в загальну систему нечіткого оцінювання. Лінгвістичні терми: низький рівень; середній рівень; високий рівень. Високі значення $In1$ свідчать про ефективне управління операційними процесами, здатність підприємства забезпечувати прибутковість діяльності та підтримувати фінансову стабільність в умовах ринкової конкуренції.

Змінна $In2$ – Фінансова стійкість підприємства відображає рівень фінансової стабільності підприємства та його здатність підтримувати безперервність функціонування в умовах зовнішніх економічних ризиків і нестабільності ринку. Фінансова стійкість є критично важливою характеристикою для будівельної галузі, оскільки реалізація будівельних проєктів пов'язана зі значними капіталовкладеннями, тривалими виробничими циклами та високою залежністю від зовнішнього фінансування.

Для оцінювання даної змінної може використовуватися інтегральний коефіцієнт фінансової стійкості, наприклад коефіцієнт автономії:

$$FS = \frac{E}{A} \quad (4.2)$$

де: FS – показник фінансової стійкості; E – власний капітал підприємства; A – загальна вартість активів.

Залежно від специфіки дослідження до цієї змінної також можуть бути інтегровані: коефіцієнт ліквідності; коефіцієнт платоспроможності; показники фінансової незалежності. Після розрахунку показник нормалізується в діапазоні $[0;1]$. Лінгвістичні оцінки: нестійкий фінансовий стан; помірна стійкість; високий рівень фінансової стійкості. Високі значення $In2$ свідчать про здатність підприємства підтримувати стабільність функціонування, своєчасно виконувати фінансові зобов'язання та забезпечувати реалізацію стратегічних програм розвитку.

Вхідна змінна $In3$ – Ресурсно-економічна ефективність характеризує рівень ефективності використання матеріальних, енергетичних, трудових та виробничих ресурсів підприємства. У сучасних умовах біосферосумісного будівництва ефективне використання ресурсів набуває особливого значення, оскільки безпосередньо впливає як на економічну результативність підприємства, так і на рівень його екологічної ефективності.

Для оцінювання даної змінної використовується коефіцієнт ресурсної ефективності:

$$RE = \frac{OR}{RC} \quad (4.3)$$

де: RE – ресурсно-економічна ефективність; OR – обсяг отриманого доходу; RC – сукупні витрати ресурсів.

У разі відсутності повного набору кількісних даних значення змінної може визначатися експертним методом із використанням шкали оцінювання. Після нормалізації значення подається у межах $[0;1]$. Лінгвістичні терми: низька ефективність; середня ефективність; висока ефективність. Високі значення $In3$ свідчать про раціональне використання ресурсів, оптимізацію витрат та здатність підприємства підтримувати ефективне функціонування в умовах обмеженості ресурсного забезпечення.

Змінна $In4$ – Інвестиційно-економічна привабливість характеризує здатність підприємства залучати інвестиції, підтримувати позитивний економічний імідж та забезпечувати перспективність довгострокового розвитку. В умовах цифрової трансформації та ESG-орієнтованого розвитку інвестиційна привабливість будівельного підприємства дедалі більше залежить не лише від фінансових показників, але й від рівня цифровізації; екологічної відповідальності; стабільності управління; інноваційної активності; репутаційної стійкості.

У зв'язку зі складністю прямої кількісної оцінки даного показника доцільним є використання інтегральної експертної оцінки або рейтингового підходу.

Для формалізації змінної використовується узагальнений інвестиційний рейтинг:

$$IA = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \quad (4.4)$$

де: IA – інвестиційно-економічна привабливість; x_i – окремі критерії оцінювання; w_i – вагові коефіцієнти критеріїв.

Після розрахунку значення також нормалізується до інтервалу $[0;1]$. Лінгвістичні терми: низька привабливість; середня привабливість; висока привабливість.

Підсистема «Цифрова зрілість управління» (*Out2*) є однією з ключових складових запропонованої багаторівневої нечітко-логічної моделі та призначена для оцінювання рівня інтеграції цифрових технологій у систему управління будівельним підприємством. У сучасних умовах цифрової економіки саме рівень цифрової зрілості значною мірою визначає здатність підприємства забезпечувати ефективне управління проєктами, адаптуватися до змін зовнішнього середовища, інтегрувати інноваційні технології та підтримувати конкурентоспроможність.

Особливого значення цифрова зрілість набуває в будівельній галузі, де реалізація проєктів супроводжується значними обсягами інформації, великою кількістю учасників та необхідністю оперативного прийняття управлінських рішень. Впровадження BIM-технологій, систем автоматизації, цифрових платформ управління, IoT, Big Data та штучного інтелекту поступово формує нову модель цифрово інтегрованого будівельного підприємства.

У межах запропонованої моделі підсистема *Out2* формується на основі чотирьох вхідних змінних:

- $In5$ – рівень цифрової інтеграції процесів;
- $In6$ – рівень автоматизації управлінських процесів;
- $In7$ – зрілість систем управління даними;
- $In8$ – цифрова компетентність персоналу.

Вибір саме цих змінних обумовлений необхідністю комплексного оцінювання не лише технічного рівня цифровізації підприємства, але й організаційної готовності до функціонування в умовах цифрової економіки.

Вхідна змінна In5 – Рівень цифрової інтеграції процесів характеризує ступінь інтеграції цифрових технологій у виробничі, організаційні та управлінські процеси будівельного підприємства. У сучасних умовах цифрової трансформації важливим є не лише використання окремих цифрових інструментів, а формування єдиного інтегрованого цифрового середовища, яке забезпечує взаємодію між усіма учасниками будівельного процесу та дозволяє здійснювати ефективний обмін інформацією протягом усього життєвого циклу проекту.

Оцінювання рівня цифрової інтеграції доцільно здійснювати з урахуванням ступеня впровадження BIM-технологій, ERP- та CRM-систем, використання хмарних сервісів, цифрових платформ управління та рівня інформаційної взаємодії між структурними підрозділами підприємства.

У зв'язку зі складністю прямого кількісного вимірювання показника доцільним є використання експертної шкали оцінювання або інтегрального індексу цифрової інтеграції:

$$DI = \sum_{i=1}^n w_i \cdot d_i \quad (4.5)$$

де: DI – рівень цифрової інтеграції; d_i – окремі показники цифрової інтеграції; w_i – вагові коефіцієнти.

Після розрахунку значення нормалізується до інтервалу [0;1]. У межах нечіткої моделі для даної змінної використовуються лінгвістичні терми «низький», «середній» та «високий» рівень цифрової інтеграції. Високі значення In5 свідчать про наявність інтегрованого цифрового середовища управління та високий рівень цифрової взаємодії між усіма елементами підприємства.

Змінна In6 – Рівень автоматизації управлінських процесів характеризує ступінь автоматизації процесів планування, координації, контролю та

прийняття управлінських рішень у межах підприємства. Автоматизація управління є одним із ключових напрямів цифрової трансформації будівельної галузі, оскільки дозволяє підвищити швидкість обробки інформації, мінімізувати вплив людського фактора та забезпечити прозорість управлінських процесів. Оцінювання рівня автоматизації доцільно здійснювати з урахуванням ступеня автоматизації документообігу, процесів планування та контролю проєктів, управління ресурсами, а також використання систем підтримки прийняття рішень і AI-орієнтованих інструментів управління.

Для кількісного оцінювання використовується коефіцієнт автоматизації процесів:

$$AP = \frac{N_a}{N_t} \quad (4.6)$$

де: AP – рівень автоматизації процесів; N_a – кількість автоматизованих процесів; N_t – загальна кількість управлінських процесів.

Отримане значення нормалізується до діапазону $[0;1]$ та інтерпретується за допомогою лінгвістичних термів «низький», «середній» та «високий» рівень автоматизації.

Вхідна змінна In_7 – Зрілість систем управління даними характеризує рівень розвитку систем збору, обробки, зберігання та використання даних у процесах управління підприємством. У сучасній цифровій економіці дані виступають одним із ключових стратегічних ресурсів, а ефективне управління ними забезпечує можливість оперативного прийняття рішень, прогнозування ризиків та оптимізації бізнес-процесів. Під час оцінювання зрілості систем управління даними доцільно враховувати наявність централізованих баз даних, рівень інтеграції аналітичних платформ, використання Big Data-технологій, систем цифрового моніторингу.

Через складність формалізації даного показника доцільним є використання інтегральної експертної оцінки:

$$DM = \sum_{i=1}^n w_i \cdot m_i \quad (4.7)$$

де: DM – зрілість систем управління даними; m_i – окремі критерії оцінювання; w_i – вагові коефіцієнти критеріїв.

Після нормалізації значення подається в інтервалі $[0;1]$ та інтерпретується через лінгвістичні терми «низька», «середня» та «висока» зрілість систем управління даними.

Змінна $In8$ – Цифрова компетентність персоналу характеризує рівень готовності персоналу підприємства до використання сучасних цифрових технологій та функціонування в умовах цифрової економіки. Незважаючи на активну автоматизацію та цифровізацію будівельної галузі, саме людський фактор значною мірою визначає ефективність цифрової трансформації підприємства. Оцінювання цифрової компетентності персоналу може здійснюватися з урахуванням рівня володіння цифровими інструментами, досвіду роботи з BIM-системами, рівня IT-компетентностей, участі працівників у програмах цифрового навчання та готовності персоналу до цифрових змін.

Для формалізації змінної використовується інтегральний індекс цифрових компетентностей:

$$DC = \sum_{i=1}^n w_i \cdot c_i \quad (4.8)$$

де: DC – цифрова компетентність персоналу; c_i – окремі критерії цифрових компетентностей; w_i – вагові коефіцієнти. Після розрахунку значення нормалізується до інтервалу $[0;1]$. У межах нечіткої моделі використовуються лінгвістичні терми «низький», «середній» та «високий» рівень цифрової компетентності.

Підсистема «Екологічна та біосферосумісна ефективність» ($Out3$) є однією з базових складових запропонованої багаторівневої нечітко-логічної моделі та призначена для комплексного оцінювання рівня екологічної

відповідальності будівельного підприємства в умовах цифрової економіки та сталого розвитку. Необхідність включення даного компонента до структури моделі обумовлена сучасними глобальними тенденціями декарбонізації, екологізації виробництва, підвищенням ролі ESG-принципів та переходом будівельної галузі до концепції біосферосумісного розвитку.

Особливого значення екологічна складова набуває в умовах активного впровадження цифрових технологій у будівництво. Використання BIM, IoT, Big Data, цифрового моніторингу та систем аналізу життєвого циклу (LCA) створює можливості для переходу до точнішого управління ресурсами, прогнозування екологічних ризиків та оптимізації екологічних параметрів будівельних проєктів.

У межах запропонованої моделі підсистема Out3 формується на основі чотирьох вхідних змінних:

- In9 – рівень енергоефективності виробництва;
- In10 – інтенсивність екологічного впливу;
- In11 – ефективність використання ресурсів і матеріалів;
- In12 – ESG-екологічна відповідність.

Вибір зазначених змінних обумовлений необхідністю комплексного врахування як виробничо-екологічних параметрів діяльності підприємства, так і рівня його відповідності сучасним міжнародним принципам сталого та біосферосумісного розвитку.

Вхідна змінна In9 – Рівень енергоефективності виробництва характеризує рівень ефективності використання енергетичних ресурсів у процесі реалізації виробничої діяльності підприємства. У сучасних умовах енергоефективність є одним із ключових факторів забезпечення екологічної стійкості будівельного підприємства, оскільки безпосередньо впливає як на рівень екологічного навантаження, так і на економічну результативність діяльності.

Для будівельної галузі проблема енергоефективності є особливо актуальною через значний рівень енергоспоживання під час виробництва

будівельних матеріалів, виконання будівельно-монтажних робіт, експлуатації техніки та функціонування виробничої інфраструктури. Підвищення енергоефективності дозволяє зменшити витрати ресурсів, скоротити обсяги викидів CO₂ та забезпечити більш раціональне використання енергетичних ресурсів.

Оцінювання цієї змінної доцільно здійснювати з урахуванням питомого енергоспоживання, рівня використання енергоощадних технологій, ефективності енергетичного менеджменту та ступеня впровадження систем моніторингу енергоспоживання. Для кількісного оцінювання використовується коефіцієнт енергоефективності:

$$EE = \frac{Q}{EC} \quad (4.9)$$

де: EE – рівень енергоефективності; Q – обсяг виконаних робіт або виробленої продукції; EC – обсяг спожитої енергії.

Отримане значення нормалізується до інтервалу [0;1]. У межах нечіткої моделі для даної змінної використовуються лінгвістичні терми «низький», «середній» та «високий» рівень енергоефективності.

Змінна In10 – Інтенсивність екологічного впливу характеризує рівень негативного впливу виробничої діяльності підприємства на навколишнє середовище. Даний показник відображає масштаб екологічного навантаження, яке формується внаслідок споживання ресурсів, утворення відходів, викидів забруднюючих речовин та інших екологічних факторів. У межах концепції біосферосумісного будівництва мінімізація екологічного впливу є одним із ключових напрямів забезпечення сталого розвитку підприємства. Саме тому оцінювання даної змінної має важливе значення для визначення рівня екологічної відповідальності будівельного підприємства.

Під час оцінювання інтенсивності екологічного впливу можуть враховуватися рівень викидів CO₂, обсяги утворення будівельних відходів, рівень забруднення навколишнього середовища, споживання водних ресурсів та інші параметри екологічного навантаження.

Для формалізації змінної використовується інтегральний коефіцієнт екологічного впливу:

$$EI = \sum_{i=1}^n w_i \cdot e_i \quad (4.10)$$

де: EI – інтенсивність екологічного впливу; e_i – окремі екологічні показники; w_i – вагові коефіцієнти.

Після нормалізації значення подається у межах [0;1]. У межах нечіткої системи використовуються лінгвістичні терми «низький», «середній» та «високий» рівень екологічного впливу. При цьому важливо враховувати, що для даної змінної високі значення можуть свідчити про підвищене екологічне навантаження, тому на етапі нормалізації доцільним є використання оберненої шкали оцінювання.

Вхідна змінна In11 – Ефективність використання ресурсів і матеріалів характеризує рівень раціональності використання матеріальних, виробничих та природних ресурсів у процесі реалізації будівельної діяльності підприємства. В умовах сучасної екологічної трансформації будівельної галузі ресурсна ефективність розглядається як один із ключових елементів концепції циклічної економіки та біосферосумісного виробництва. Раціональне використання матеріалів дозволяє не лише знижувати витрати підприємства, але й мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище через скорочення обсягів споживання природних ресурсів та утворення відходів.

Оцінювання цієї змінної доцільно здійснювати з урахуванням рівня повторного використання матеріалів, коефіцієнта втрат ресурсів, ефективності використання сировини, а також рівня оптимізації логістичних і виробничих процесів.

Для кількісного оцінювання використовується коефіцієнт ресурсної ефективності:

$$RE = \frac{MU}{MR} \quad (4.11)$$

де: RE – ефективність використання ресурсів; MU – корисний обсяг використаних матеріалів; MR – загальний обсяг використаних ресурсів.

Після нормалізації значення подається в інтервалі $[0;1]$. Для нечіткої моделі використовуються лінгвістичні терми «низька», «середня» та «висока» ефективність використання ресурсів.

Змінна $In12$ – ESG-екологічна відповідність характеризує рівень відповідності діяльності підприємства сучасним екологічним вимогам, ESG-принципам та міжнародним стандартам сталого розвитку. У сучасних умовах ESG-фактори дедалі більше впливають на діяльність будівельних підприємств, визначаючи можливості доступу до інвестицій, участі в міжнародних проєктах та рівень конкурентоспроможності на глобальному ринку. Саме тому оцінювання ESG-екологічної відповідності є важливою складовою комплексного аналізу екологічної ефективності підприємства.

Оцінювання даної змінної може здійснюватися з урахуванням наявності ESG-стратегії, рівня дотримання міжнародних екологічних стандартів, впровадження систем екологічного менеджменту, підготовки ESG-звітності та участі підприємства у програмах сталого розвитку.

Через складність формалізації значної частини ESG-параметрів доцільним є використання інтегральної експертної оцінки:

$$ESG = \sum_{i=1}^n w_i \cdot s_i \quad (4.12)$$

де: ESG – рівень ESG-екологічної відповідності; s_i – окремі критерії оцінювання; w_i – вагові коефіцієнти критеріїв.

Після нормалізації значення подається в межах $[0;1]$. У межах нечіткої системи використовуються лінгвістичні терми «низький», «середній» та «високий» рівень ESG-відповідності.

Підсистема «*Стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість*» (*Out4*) є важливою складовою запропонованої багаторівневої нечітко-логічної моделі та призначена для оцінювання соціально-управлінських аспектів функціонування будівельного підприємства. Включення даного компонента до структури моделі обумовлене сучасними тенденціями розвитку будівельної галузі, в межах яких людський капітал, якість взаємодії зі стейкхолдерами та

рівень соціальної відповідальності дедалі більше впливають на ефективність реалізації будівельних проєктів і довгострокову стійкість підприємства.

На відміну від традиційних виробничо-орієнтованих моделей управління, сучасна концепція біосферосумісного та ESG-орієнтованого розвитку передбачає необхідність формування людиноцентричного середовища управління, в якому ключове значення мають не лише економічні результати, але й якість соціальної взаємодії, безпечність трудового середовища, рівень довіри між учасниками проєкту та ефективність комунікаційних процесів.

Для будівельної галузі це має особливе значення через складність організаційної структури будівельних проєктів, велику кількість учасників та високий рівень міжорганізаційної взаємодії. Ефективність реалізації будівельного проєкту значною мірою залежить від здатності підприємства забезпечувати координацію інтересів різних груп стейкхолдерів, підтримувати сприятливе трудове середовище та формувати ефективну систему соціальної комунікації.

У межах запропонованої моделі підсистема Out4 формується на основі чотирьох вхідних змінних:

- In13 – безпека та якість трудового середовища;
- In14 – задоволеність стейкхолдерів;
- In15 – рівень корпоративної соціальної відповідальності;
- In16 – ефективність комунікаційної взаємодії.

Вибір зазначених змінних обумовлений необхідністю комплексного оцінювання як внутрішнього соціального середовища підприємства, так і якості його взаємодії із зовнішніми зацікавленими сторонами.

Вхідна змінна In13 – Безпека та якість трудового середовища характеризує рівень безпечності, організаційної комфортності та якості умов праці на підприємстві. У сучасних умовах управління людський капітал розглядається як один із ключових стратегічних ресурсів будівельного

підприємства, а забезпечення безпечного та стабільного трудового середовища стає важливою умовою підтримання ефективності діяльності.

Для будівельної галузі проблема безпеки праці має особливе значення через підвищений рівень виробничих ризиків, складність технологічних процесів та значний вплив людського фактора на безпечність реалізації будівельних робіт. Саме тому оцінювання даної змінної повинно враховувати не лише формальні показники виробничого травматизму, але й загальний рівень організації трудового середовища.

Оцінювання показника доцільно здійснювати з урахуванням рівня виробничої безпеки, умов праці, ефективності систем охорони праці, стабільності кадрового середовища, а також рівня задоволеності персоналу умовами професійної діяльності. Для кількісного оцінювання використовується інтегральний індекс безпеки трудового середовища:

$$WS = \sum_{i=1}^n w_i \cdot s_i \quad (4.13)$$

де: WS – безпека та якість трудового середовища; s_i – окремі критерії оцінювання; w_i – вагові коефіцієнти.

Після нормалізації значення подається у межах $[0;1]$. У межах нечіткої моделі використовуються лінгвістичні терми «низький», «середній» та «високий» рівень безпеки трудового середовища.

Змінна $In14$ – Задоволеність стейкхолдерів характеризує рівень задоволеності зацікавлених сторін результатами діяльності підприємства, якістю взаємодії та ефективністю реалізації будівельних проєктів.

У сучасній системі управління будівельне підприємство функціонує як елемент складної стейкхолдерної екосистеми, до якої входять інвестори, замовники, підрядники, працівники, постачальники, органи державного управління, місцеві громади та інші учасники будівельного процесу. Рівень задоволеності цих груп безпосередньо впливає на репутацію підприємства, стабільність партнерських відносин та успішність реалізації проєктів. Оцінювання даної змінної доцільно здійснювати на основі аналізу рівня довіри між учасниками проєкту, якості співпраці, рівня конфліктності, стабільності

партнерських взаємовідносин та загального рівня задоволеності результатами діяльності підприємства.

Через складність формалізації соціально-поведінкових параметрів доцільним є використання інтегральної експертної оцінки:

$$SS = \sum_{i=1}^n w_i \cdot p_i \quad (4.14)$$

де: SS – рівень задоволеності стейкхолдерів; p_i – окремі критерії оцінювання; w_i – вагові коефіцієнти.

Після нормалізації значення подається в інтервалі [0;1]. У межах нечіткої моделі використовуються лінгвістичні терми «низький», «середній» та «високий» рівень задоволеності стейкхолдерів.

Вхідна змінна In15 – Рівень корпоративної соціальної відповідальності характеризує рівень інтеграції принципів корпоративної соціальної відповідальності (CSR) у систему управління підприємством. У сучасних умовах корпоративна соціальна відповідальність розглядається не лише як репутаційний елемент діяльності компанії, а як важливий інструмент забезпечення довгострокової стійкості, підвищення довіри з боку стейкхолдерів та підтримання конкурентоспроможності підприємства.

Для будівельної галузі CSR має особливе значення через значний соціальний та екологічний вплив будівельних проєктів на суспільство, територіальні громади та навколишнє середовище. Саме тому рівень соціальної відповідальності підприємства дедалі більше впливає на його інвестиційну привабливість та можливості участі у великих міжнародних проєктах.

Оцінювання даної змінної може здійснюватися з урахуванням наявності CSR-стратегії, реалізації соціальних програм, рівня прозорості діяльності підприємства, участі у програмах сталого розвитку та рівня соціальної взаємодії із суспільством.

Для формалізації показника використовується інтегральний CSR-індекс:

$$CSR = \sum_{i=1}^n w_i \cdot c_i \quad (4.15)$$

де: CSR – рівень корпоративної соціальної відповідальності; c_i – окремі критерії оцінювання; w_i – вагові коефіцієнти.

Після нормалізації значення подається у межах $[0;1]$. У межах нечіткої системи використовуються лінгвістичні терми «низький», «середній» та «високий» рівень CSR.

Змінна In16 – Ефективність комунікаційної взаємодії характеризує рівень ефективності інформаційної та організаційної взаємодії між учасниками будівельного процесу.

У сучасних цифрових екосистемах будівельних проєктів ефективна комунікація є одним із ключових факторів забезпечення координації робіт, оперативності прийняття рішень та мінімізації управлінських ризиків. Недостатній рівень комунікаційної взаємодії часто призводить до конфліктів, затримок реалізації проєктів, дублювання функцій та зростання організаційних втрат.

Оцінювання даної змінної доцільно здійснювати з урахуванням швидкості інформаційного обміну, прозорості комунікаційних процесів, ефективності цифрової взаємодії між учасниками проєкту, рівня інформаційної доступності та стабільності комунікаційних каналів.

Для кількісного оцінювання використовується інтегральний коефіцієнт комунікаційної ефективності:

$$CE = \sum_{i=1}^n w_i \cdot k_i \quad (4.16)$$

де: CE – ефективність комунікаційної взаємодії; k_i – окремі критерії оцінювання; w_i – вагові коефіцієнти.

Після нормалізації значення подається в інтервалі $[0;1]$. Для нечіткої моделі використовуються лінгвістичні терми «низька», «середня» та «висока» ефективність комунікаційної взаємодії.

Підсистема «Організаційно-інноваційна стійкість» (Out5) є завершальною складовою нижнього рівня запропонованої багаторівневої нечітко-логічної моделі та призначена для оцінювання здатності будівельного

підприємства адаптуватися до змін зовнішнього середовища, підтримувати інноваційний розвиток та забезпечувати стабільність функціонування в умовах високої економічної, технологічної та організаційної турбулентності.

У сучасних умовах цифрової економіки саме організаційна стійкість дедалі більше визначає конкурентоспроможність підприємства та його здатність забезпечувати довгострокову ефективність функціонування. Для будівельної галузі це має особливе значення через високий рівень залежності від ринкових коливань, інвестиційної активності, змін нормативно-правового середовища, технологічних трансформацій та логістичних ризиків.

Крім того, активне впровадження BIM, AI, цифрових платформ управління, автоматизації та ESG-орієнтованих стратегій потребує від підприємства не лише технічної модернізації, але й трансформації організаційної структури, управлінських процесів та системи прийняття рішень. У багатьох випадках саме недостатній рівень організаційної адаптивності стає основною причиною низької ефективності цифрової трансформації.

У межах запропонованої моделі підсистема Out5 формується на основі чотирьох вхідних змінних:

- In17 – адаптивність системи управління;
- In18 – інноваційна активність підприємства;
- In19 – ризикостійкість підприємства;
- In20 – стратегічна організаційна гнучкість.

Вибір зазначених змінних обумовлений необхідністю комплексного оцінювання здатності підприємства забезпечувати стійкий розвиток, підтримувати інноваційну активність та ефективно реагувати на внутрішні й зовнішні зміни.

Вхідна змінна In17 – Адаптивність системи управління характеризує здатність системи управління підприємства оперативно реагувати на зміни зовнішнього та внутрішнього середовища, забезпечувати трансформацію управлінських процесів та підтримувати ефективність функціонування в

умовах динамічних змін. Для будівельної галузі адаптивність управління є критично важливою характеристикою через високу мінливість ринку, постійні зміни нормативної бази, коливання вартості ресурсів, нестабільність інвестиційного середовища та швидкі темпи технологічного розвитку. У сучасних умовах підприємство повинно бути здатним не лише реагувати на зміни, але й прогнозувати їх вплив на виробничі та управлінські процеси.

Оцінювання даної змінної доцільно здійснювати з урахуванням швидкості управлінського реагування, гнучкості організаційної структури, ефективності управління змінами, рівня інтеграції цифрових рішень та здатності підприємства адаптувати внутрішні процеси до нових умов функціонування.

Для кількісного оцінювання використовується інтегральний індекс адаптивності:

$$AD = \sum_{i=1}^n w_i \cdot a_i \quad (4.17)$$

де: AD – адаптивність системи управління; a_i – окремі критерії оцінювання; w_i – вагові коефіцієнти.

Після нормалізації значення подається у межах $[0;1]$. У межах нечіткої моделі використовуються лінгвістичні терми «низька», «середня» та «висока» адаптивність системи управління.

Змінна $In18$ – Інноваційна активність підприємства характеризує рівень здатності підприємства генерувати, впроваджувати та масштабувати інноваційні рішення у виробничій, управлінській та цифровій діяльності. У сучасних умовах інноваційна активність є одним із ключових факторів забезпечення конкурентоспроможності будівельного підприємства. Впровадження нових технологій, цифрових платформ, екологічних рішень та сучасних управлінських підходів дозволяє підвищувати ефективність діяльності, скорочувати витрати та забезпечувати більш високий рівень адаптації до змін ринку.

Для будівельної галузі інноваційність особливо важлива у контексті розвитку Smart Construction, BIM, автоматизації процесів та переходу до біосферосумісного виробництва. Саме тому рівень інноваційної активності підприємства безпосередньо впливає на його здатність підтримувати цифрову трансформацію та реалізовувати ESG-орієнтовані стратегії.

Оцінювання даної змінної може здійснюватися з урахуванням обсягів інвестицій в інновації, рівня впровадження нових технологій, інтенсивності цифрових трансформацій, участі підприємства в інноваційних проєктах та рівня оновлення управлінських і виробничих процесів.

Для формалізації показника використовується інтегральний інноваційний індекс:

$$IN = \sum_{i=1}^n w_i \cdot n_i \quad (4.18)$$

де: IN – інноваційна активність підприємства; n_i – окремі критерії оцінювання; w_i – вагові коефіцієнти.

Після нормалізації значення подається в інтервалі [0;1]. Для нечіткої системи використовуються лінгвістичні терми «низький», «середній» та «високий» рівень інноваційної активності.

Вхідна змінна In19 – Ризикостійкість підприємства характеризує здатність підприємства підтримувати стабільність функціонування в умовах внутрішніх та зовнішніх ризиків, кризових ситуацій і високого рівня невизначеності.

Будівельна галузь є однією з найбільш ризикозалежних сфер економіки, оскільки діяльність підприємств значною мірою залежить від інвестиційної активності, вартості ресурсів, логістичних процесів, змін нормативної бази та макроекономічної стабільності. Крім того, сучасні цифрові трансформації створюють додаткові кіберризики, інформаційні загрози та організаційні виклики. У зв'язку з цим ризикостійкість розглядається як одна з ключових характеристик ефективного економіко-цифрового управління підприємством. Високий рівень ризикостійкості забезпечує здатність підприємства

підтримувати стабільність реалізації проєктів, швидко реагувати на кризові ситуації та мінімізувати негативний вплив зовнішніх факторів.

Оцінювання даної змінної доцільно здійснювати з урахуванням рівня диверсифікації ризиків, ефективності системи ризик-менеджменту, фінансової стабільності, стійкості логістичних процесів та здатності підприємства до кризового реагування.

Для кількісного оцінювання використовується інтегральний коефіцієнт ризикостійкості:

$$RS = \sum_{i=1}^n w_i \cdot r_i \quad (4.19)$$

де: RS – рівень ризикостійкості; r_i – окремі критерії оцінювання; w_i – вагові коефіцієнти.

Після нормалізації значення подається у межах [0;1]. У межах нечіткої моделі використовуються лінгвістичні терми «низька», «середня» та «висока» ризикостійкість підприємства.

Змінна In20 – Стратегічна організаційна гнучкість характеризує здатність підприємства змінювати стратегічні напрями розвитку, адаптувати організаційну структуру та перебудовувати систему управління відповідно до змін зовнішнього середовища.

У сучасних умовах цифрової економіки стратегічна гнучкість стає одним із ключових факторів підтримання довгострокової конкурентоспроможності підприємства. Високий рівень організаційної гнучкості дозволяє швидше інтегрувати нові технології, адаптуватися до змін ринку та забезпечувати більш ефективне управління інноваційними процесами.

Для будівельної галузі це особливо важливо через довготривалий характер реалізації проєктів, значну залежність від ринкової кон'юнктури та необхідність швидкого реагування на зміни нормативних, економічних та технологічних умов. Оцінювання даної змінної може здійснюватися з урахуванням рівня стратегічної адаптивності, гнучкості організаційної

структури, швидкості прийняття стратегічних рішень, здатності до реорганізації управлінських процесів та рівня інтеграції сучасних управлінських підходів.

Для формалізації показника використовується інтегральний коефіцієнт стратегічної гнучкості:

$$SF = \sum_{i=1}^n w_i \cdot f_i \quad (4.20)$$

де: SF – стратегічна організаційна гнучкість; f_i – окремі критерії оцінювання; w_i – вагові коефіцієнти.

Після нормалізації значення подається в інтервалі [0;1]. Для нечіткої системи використовуються лінгвістичні терми «низька», «середня» та «висока» стратегічна гнучкість.

Для оцінювання *економічної результативності будівельного підприємства* у межах запропонованої моделі використано апарат нечіткої логіки, який дозволяє формалізувати складні багатофакторні процеси управління в умовах невизначеності, неповноти інформації та наявності якісних характеристик [216]. Доцільність використання саме нечітко-логічного підходу пояснюється тим, що економічний стан підприємства не може бути адекватно описаний виключно за допомогою жорстких математичних меж або класичних детермінованих моделей [219].

У реальних умовах функціонування будівельних підприємств значна частина економічних параметрів має інтервальний або нечіткий характер. Наприклад, такі категорії, як «висока фінансова стійкість», «достатня інвестиційна привабливість» або «ефективне використання ресурсів», не мають чітко визначених меж та значною мірою залежать від експертної інтерпретації, ринкової ситуації та особливостей конкретного підприємства. У зв'язку з цим використання класичних лінійних моделей часто призводить до спрощення складних управлінських взаємозв'язків [220, 221].

На відміну від традиційних підходів, нечітка логіка дозволяє моделювати процеси прийняття рішень наближено до реального експертного

мислення [217]. Основу такого підходу становить використання лінгвістичних змінних, нечітких множин та системи нечітких правил типу «IF–THEN», що забезпечує можливість інтеграції кількісних і якісних параметрів у межах єдиної моделі [221].

У межах запропонованої архітектури підсистема *оцінювання економічної результативності підприємства* функціонує як окрема нечітко-логічна система висновку, яка формує інтегральний вихідний показник Out1 (рис. 4.2).

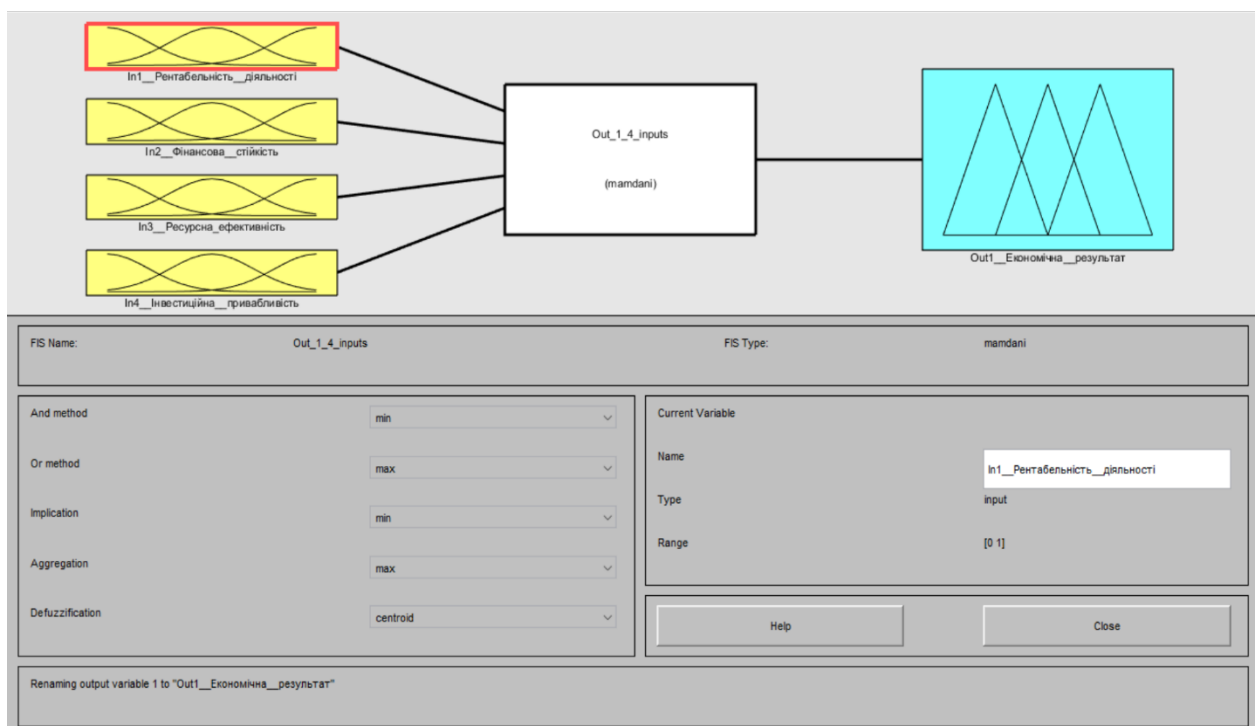


Рис. 4.2. Візуалізація підсистеми нечіткого висновку Out1

Джерело: розроблено автором.

Вхідними змінними даної підсистеми є:

- In1 – рентабельність операційної діяльності (рис. 4.3);
- In2 – фінансова стійкість підприємства (рис. 4.4);
- In3 – ресурсно-економічна ефективність (рис. 4.5);
- In4 – інвестиційно-економічна привабливість (рис. 4.6).

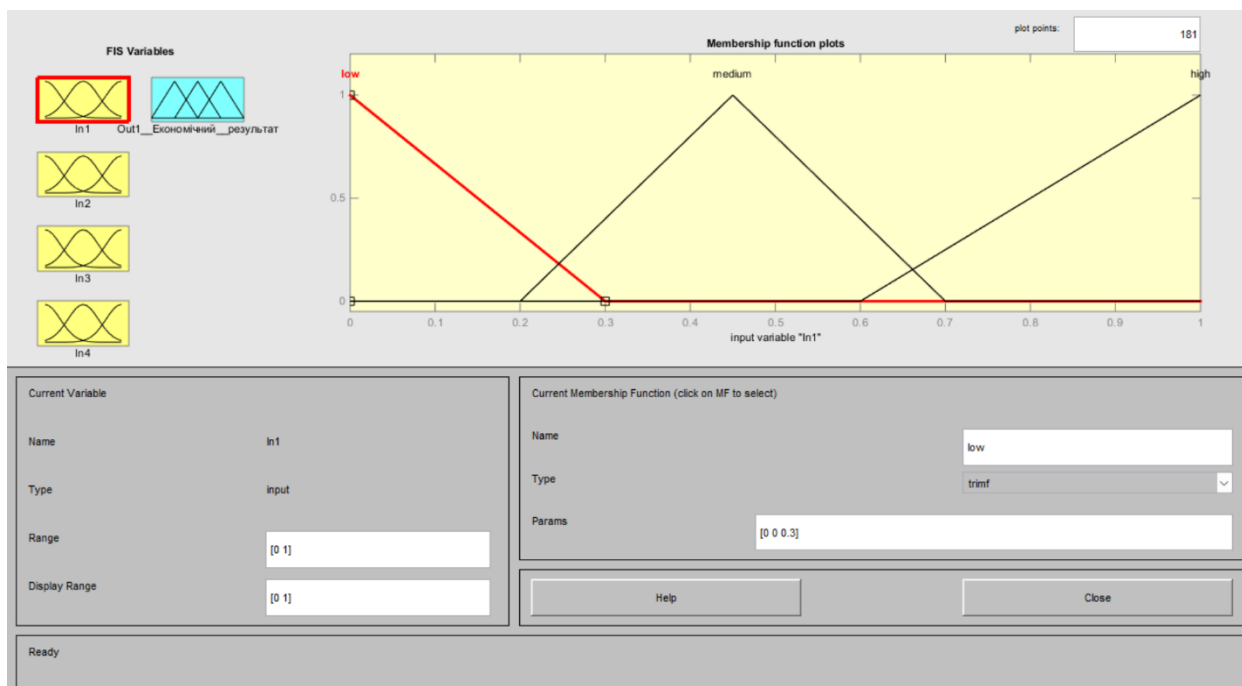


Рис. 4.3. Візуалізація вхідної змінної In1 – рентабельність операційної діяльності

Джерело: розроблено автором.

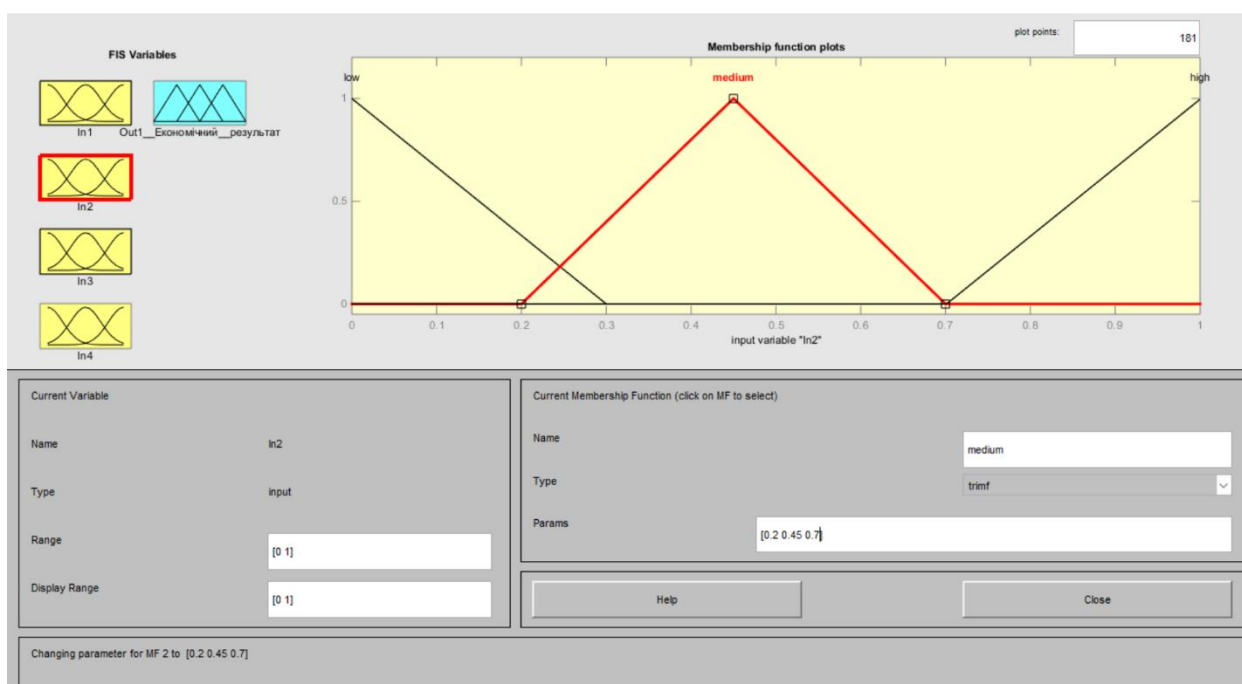


Рис. 4.4. Візуалізація вхідної змінної In2 – фінансова стійкість підприємства

Джерело: розроблено автором.

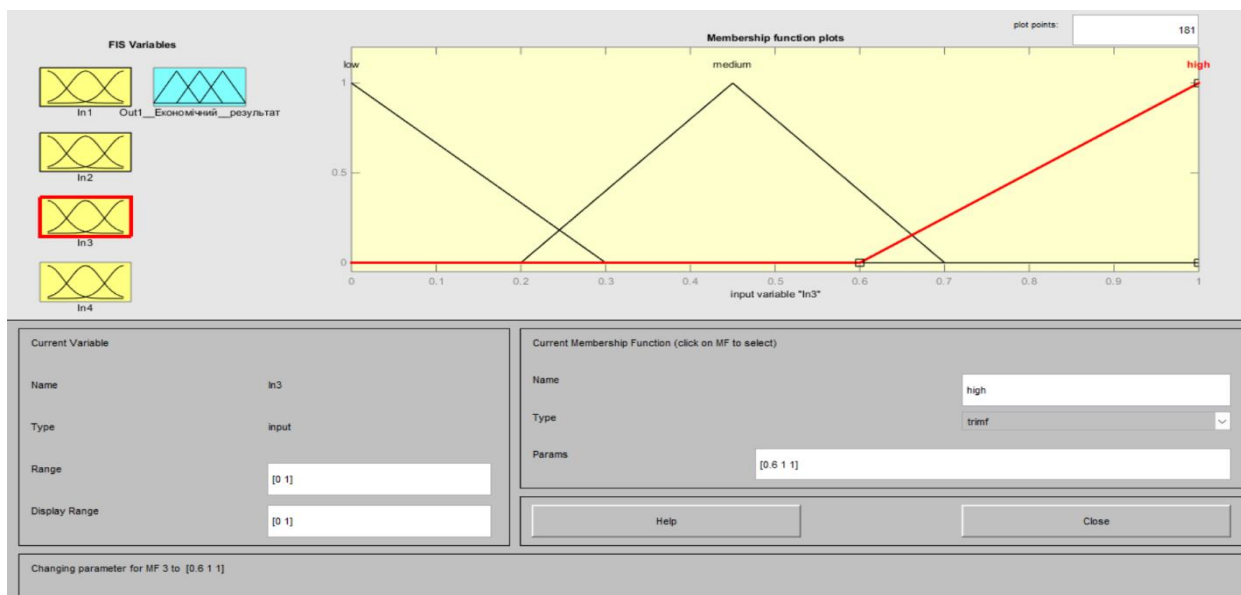


Рис. 4.5. Візуалізація входної змінної In3 – ресурсно-економічна ефективність

Джерело: розроблено автором.

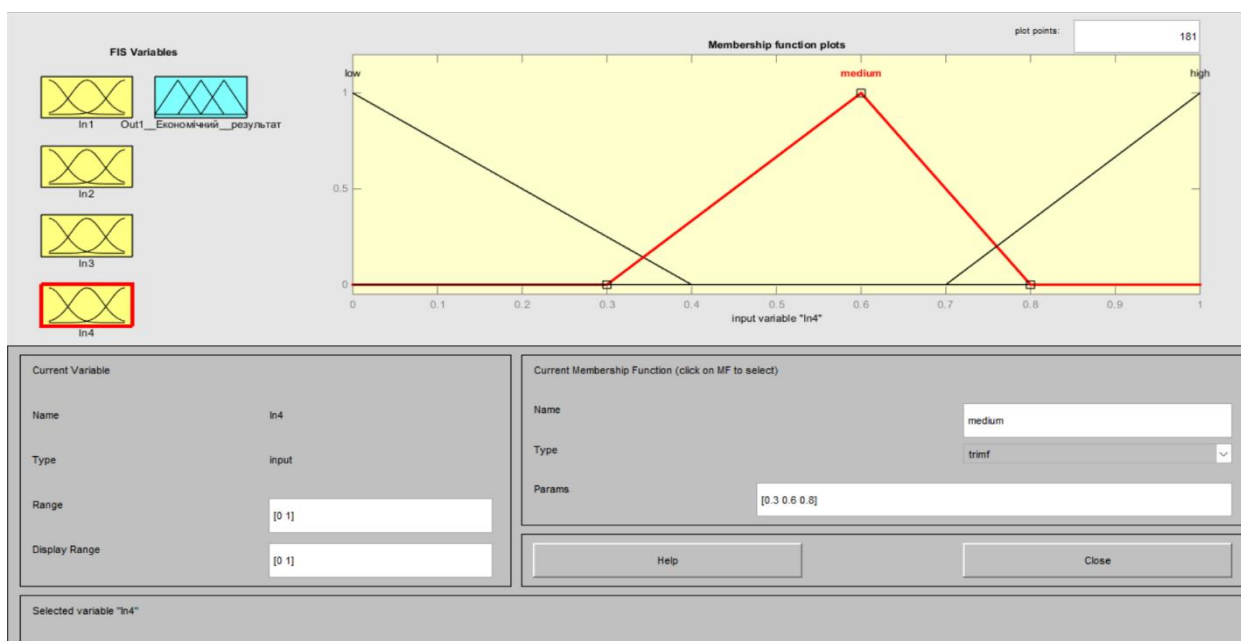


Рис. 4.6. Візуалізація входної змінної In4 – інвестиційно-економічна привабливість

Джерело: розроблено автором.

Процес нечітко-логічного оцінювання складається з декількох послідовних етапів: фазифікації входних змінних, формування бази нечітких правил, виконання нечіткого логічного висновку, агрегації результатів та дефазифікації фінального виходу [218].

На першому етапі здійснюється підготовка та нормалізація вхідних даних. Оскільки всі вхідні змінні можуть мати різні одиниці вимірювання та різні діапазони значень, виникає необхідність приведення їх до єдиного масштабу. Для цього використовується процедура нормалізації до інтервалу $[0;1]$.

Для показників прямої дії, де збільшення значення свідчить про покращення економічного стану підприємства, використовується формула:

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (4.21)$$

де: x' – нормалізоване значення показника; x – фактичне значення показника; x_{min} – мінімальне значення показника; x_{max} – максимальне значення показника.

Для показників оберненої дії, де збільшення значення негативно впливає на економічну результативність, використовується обернена нормалізація:

$$x' = \frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}} \quad (4.22)$$

Після нормалізації всі вхідні змінні подаються у вигляді значень у межах $[0;1]$, що забезпечує можливість їх інтеграції в межах єдиної нечітко-логічної системи.

Наступним етапом є фазифікація вхідних змінних [219]. На цьому етапі кожне чітке значення перетворюється у ступінь належності до відповідних нечітких множин. У межах даної моделі для всіх вхідних змінних використовуються три базові лінгвістичні терми: Low (низький рівень); Medium (середній рівень); High (високий рівень).

Для опису нечітких множин використано трикутні функції належності, які є одними з найбільш поширених у задачах управління та нечіткого моделювання завдяки простоті реалізації та високій інтерпретованості.

Трикутна функція належності визначається виразом [219]:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (4.23)$$

де: $\mu_A(x)$ – ступінь належності елемента x до нечіткої множини A ; a, b, c – параметри трикутної функції належності.

Наприклад, якщо нормалізоване значення рентабельності операційної діяльності становить 0,72, то дана змінна може одночасно належати до множини «Medium» із певним ступенем належності та до множини «High» із іншим ступенем належності. Саме така особливість нечіткої логіки дозволяє уникати різких переходів між класами та забезпечує більш гнучке моделювання економічних процесів.

Одним із ключових етапів побудови нечітко-логічної системи оцінювання економічної результативності підприємства є формування бази нечітких правил [220, 221]. Саме база правил забезпечує трансформацію експертних знань та логіки управлінського мислення у формалізовану систему прийняття рішень. У межах запропонованої моделі нечіткі правила визначають характер взаємозв'язку між вхідними економічними параметрами та інтегральним показником економічної результативності підприємства.

Теоретично при використанні чотирьох вхідних змінних та трьох лінгвістичних термів для кожної змінної загальна кількість можливих комбінацій правил становить [19]:

$$N = 3^4 = 81$$

Однак формування повної бази з 81 правила у більшості практичних задач є недоцільним. Значна частина комбінацій або практично не зустрічається у реальних умовах функціонування підприємства, або не здійснює суттєвого впливу на фінальний результат моделювання. Крім того, надмірно велика база правил ускладнює інтерпретацію моделі, знижує прозорість системи та підвищує складність подальшого налаштування моделі.

У зв'язку з цим у межах цього дослідження використовується скорочена експертна база правил, яка охоплює найбільш характерні та логічно значущі сценарії функціонування підприємства. Такий підхід дозволяє забезпечити баланс між адекватністю моделювання та складністю системи.

При цьому основна ідея полягає в тому, що високий рівень економічної результативності можливий лише за умови достатньо високих значень більшості ключових економічних параметрів. Водночас низькі значення критично важливих змінних можуть суттєво знижувати загальний рівень економічної ефективності навіть за наявності окремих позитивних характеристик [20].

У межах підсистеми використовуються три лінгвістичні терми: Low – низький рівень; Medium – середній рівень; High – високий рівень. Вихідна змінна Out1 також описується аналогічними термами [219].

Базові нечіткі правила формуються у вигляді конструкцій типу:

IF In1 is High AND In2 is High AND In3 is High AND In4 is High THEN Out1 is High.

У межах даної моделі сформовано мінімально необхідну базу правил, яка дозволяє описати основні сценарії економічного стану підприємства.

Перше правило відображає найбільш сприятливий сценарій функціонування підприємства:

IF In1 is High AND In2 is High AND In3 is High AND In4 is High THEN Out1 is High.

Дане правило означає, що високий рівень рентабельності діяльності, фінансової стійкості, ефективності використання ресурсів та інвестиційної привабливості формує високий рівень економічної результативності підприємства.

Наступне правило описує ситуацію помірно позитивного економічного стану:

IF In1 is Medium AND In2 is High AND In3 is Medium AND In4 is Medium THEN Out1 is Medium.

У цьому випадку підприємство характеризується достатньо стабільним економічним станом, однак окремі параметри ще не забезпечують досягнення високого рівня економічної результативності.

Третє правило відображає вплив фінансової нестабільності:

IF In2 is Low THEN Out1 is Low.

Дане правило базується на тому, що низький рівень фінансової стійкості є критичним фактором ризику для будівельного підприємства незалежно від інших економічних параметрів.

Четверте правило описує вплив низької рентабельності:

IF In1 is Low AND In3 is Low THEN Out1 is Low.

Це правило відображає ситуацію, коли низька прибутковість діяльності одночасно з неефективним використанням ресурсів формує загальний низький рівень економічної результативності.

П'яте правило характеризує підприємства зі стабільною економічною базою, але недостатньою інвестиційною активністю:

IF In1 is High AND In2 is High AND In4 is Low THEN Out1 is Medium.

У цьому випадку підприємство демонструє достатньо високі поточні економічні показники, однак низька інвестиційна привабливість обмежує його довгостроковий потенціал розвитку.

Шосте правило враховує позитивний вплив ефективного ресурсного управління:

IF In3 is High AND In2 is Medium AND In1 is Medium THEN Out1 is Medium.

Дане правило відображає ситуацію, коли ефективне використання ресурсів частково компенсує недостатньо високі фінансові показники.

Сьоме правило описує критично негативний економічний сценарій:

IF In1 is Low AND In2 is Low AND In3 is Low THEN Out1 is Low.

У цьому випадку одночасна наявність низької рентабельності, фінансової нестійкості та неефективного використання ресурсів формує низький рівень економічної результативності підприємства.

Восьме правило враховує позитивний вплив інвестиційної привабливості:

IF In4 is High AND In2 is High THEN Out1 is High.

Таке правило відображає ситуацію, коли підприємство має стабільний фінансовий стан та високий інвестиційний потенціал, що формує сприятливі умови для розвитку.

Дев'яте правило описує типову ситуацію середнього рівня економічного розвитку:

IF In1 is Medium AND In2 is Medium AND In3 is Medium AND In4 is Medium THEN Out1 is Medium.

У межах даної моделі саме така скорочена база правил дозволяє забезпечити достатній рівень адекватності нечітко-логічного моделювання без надмірного ускладнення системи. Крім того, використання компактної експертної бази правил значно спрощує подальше калібрування моделі, проведення сценарного аналізу та інтеграцію системи з іншими методами багатокритеріального оцінювання.

Після формування бази правил кожне правило бере участь у процедурі нечіткого логічного висновку відповідно до алгоритму Mamdani. Для кожного правила визначається ступінь його активації залежно від значень вхідних змінних, після чого виконується агрегація результатів та дефазифікація фінального виходу.

Після формування бази правил виконується процедура нечіткого логічного висновку. У межах даного дослідження використовується алгоритм Mamdani, який є одним із найбільш поширених методів нечіткого моделювання в задачах управління та прийняття рішень.

На цьому етапі для кожного правила визначається ступінь його активації. Для операції логічного «AND» використовується оператор мінімуму:

$$\alpha_i = \min (\mu_1(x_1), \mu_2(x_2), \dots, \mu_n(x_n)) \quad (4.24)$$

де: α_i – рівень активації i -го правила; $\mu_i(x_i)$ – ступінь належності відповідної змінної до нечіткої множини.

У результаті кожне правило генерує нечіткий вихід, який характеризує рівень економічної результативності підприємства.

Наступним етапом є агрегація результатів усіх активованих правил у єдину нечітку множину вихідної змінної. Для цього використовується оператор максимуму:

$$\mu_{out}(y) = \max(\mu_1(y), \mu_2(y), \dots, \mu_n(y)) \quad (4.25)$$

Після агрегації виконується дефазифікація, тобто перетворення нечіткого виходу у чітке числове значення. У межах даного дослідження використовується метод центру ваги, який забезпечує стабільні та інтерпретовані результати.

Формула дефазифікації має вигляд:

$$y^* = \frac{\int y\mu(y)dy}{\int \mu(y)dy} \quad (4.26)$$

де: y^* – дефазифіковане значення вихідної змінної; $\mu(y)$ – агрегована функція належності вихідної змінної.

У результаті виконання всіх етапів формується фінальне значення показника Out1 – «Економічна результативність підприємства», яке подається у нормалізованому вигляді в межах $[0;1]$ (рис. 4.7).

Отримане значення є інтегральною оцінкою економічного стану підприємства та враховує одночасний вплив рентабельності діяльності, фінансової стійкості, ефективності використання ресурсів та інвестиційної привабливості. На відміну від традиційних економічних моделей, запропонований нечітко-логічний підхід дозволяє враховувати складні нелінійні взаємозв'язки між параметрами та забезпечує більш адаптивне моделювання економічних процесів в умовах невизначеності.

Сформований показник Out1 надалі використовується як одна з ключових вхідних змінних верхнього рівня моделі під час формування інтегрального індексу IDEM, що дозволяє інтегрувати економічну складову у

загальну систему оцінювання ефективності економіко-цифрового управління будівельним підприємством.

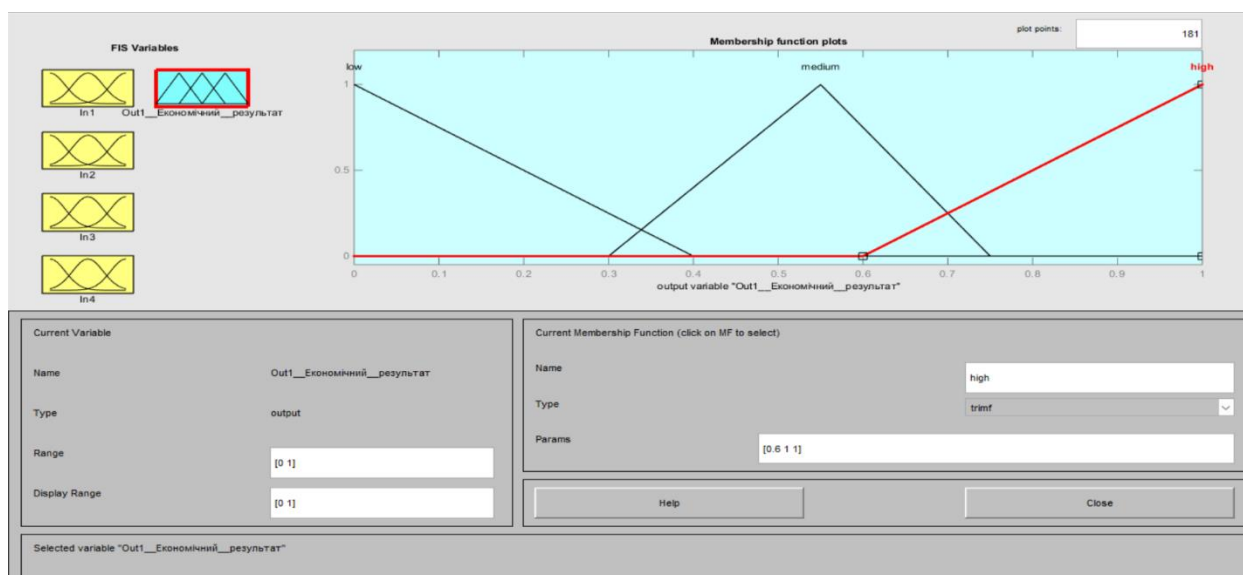


Рис. 4.7. Візуалізація вихідної змінної Out1 «Економічна результативність підприємства»

Джерело: розроблено автором.

Фінальним етапом побудови запропонованої багаторівневої нечіткої логічної моделі є формування *інтегрального показника IDEM (Integrated Digital-Economic Management Index)*, який відображає загальний рівень ефективності економіко-цифрового управління будівельним підприємством в умовах біосферосумісного розвитку та цифрової економіки (рис. 4.8).

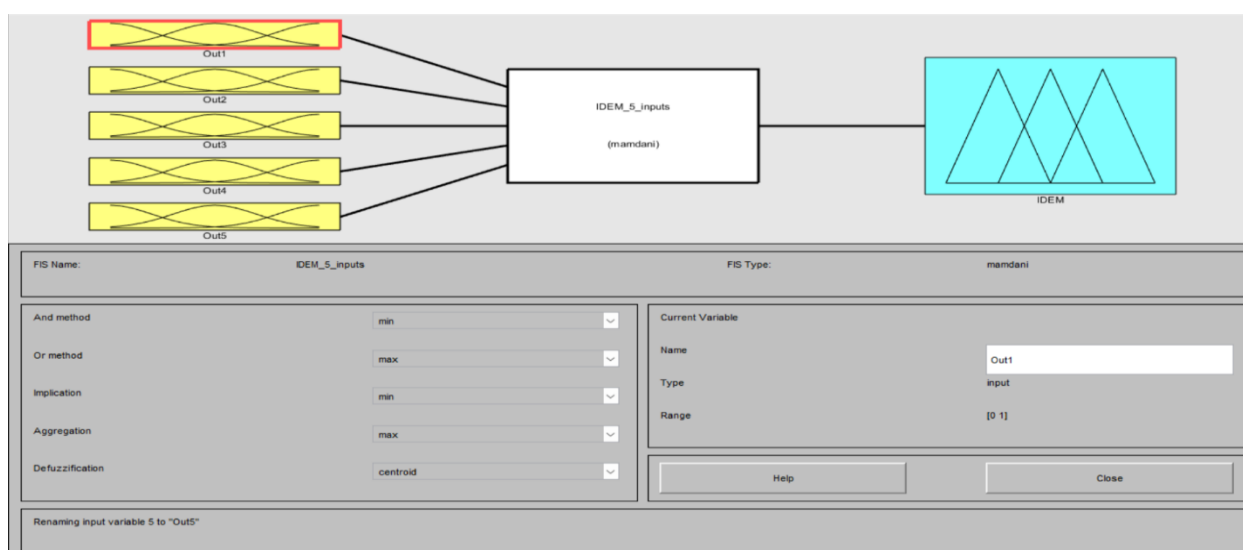


Рис. 4.8. Візуалізація головної системи нечіткого висновку IDEM

Джерело: розроблено автором.

На відміну від нижнього рівня моделі, де здійснюється оцінювання окремих функціональних складових діяльності підприємства, верхній рівень системи виконує інтеграційну функцію та забезпечує комплексне агрегування результатів роботи всіх підсистем у межах єдиного інтегрального індексу. Саме цей етап є ключовим для формування узагальненої оцінки ефективності сучасної моделі управління будівельним підприємством.

Необхідність використання інтегрального підходу пояснюється складністю та багатокомпонентністю сучасних систем управління у будівництві. У реальних умовах ефективність підприємства не може визначатися лише економічними показниками або окремими характеристиками цифровізації. Сучасне будівельне підприємство функціонує як складна соціально-економічна та цифрово-екологічна система, в межах якої одночасно взаємодіють фінансові, технологічні, екологічні, організаційні та соціальні фактори. У зв'язку з цим виникає необхідність формування інтегрованого показника, здатного враховувати взаємозалежність усіх ключових компонентів системи управління підприємством. Саме таку функцію виконує індекс IDEM, який виступає фінальним результатом роботи всієї багаторівневої нечітко-логічної системи.

Процес функціонування верхнього рівня моделі загалом повторює класичну структуру нечіткої системи висновку. На першому етапі здійснюється фазифікація вхідних змінних, тобто перетворення числових значень Out1–Out5 у ступені належності до відповідних нечітких множин. Після цього формується база нечітких правил, яка описує логіку взаємодії між окремими компонентами системи.

База правил верхнього рівня є одним із ключових елементів усієї системи нечіткого моделювання, оскільки саме на цьому етапі здійснюється інтеграція економічних, цифрових, екологічних, соціальних та організаційних компонентів у межах єдиної системи оцінювання ефективності економіко-цифрового управління підприємством.

На відміну від класичних інтегральних моделей, де підсумковий показник часто формується шляхом лінійного агрегування або зваженого сумування параметрів, використання нечіткої логіки дозволяє враховувати складні нелінійні взаємозв'язки між окремими складовими системи. Це має особливе значення для сучасних будівельних підприємств, де окремі компоненти системи управління можуть суттєво посилювати або, навпаки, обмежувати вплив один одного.

Теоретично при використанні п'яти вхідних змінних та трьох лінгвістичних термів загальна кількість можливих комбінацій правил становить:

$$N = 3^5 = 243$$

Однак побудова повної бази з 243 правил є надмірно складною та практично недоцільною. Значна частина можливих комбінацій не має суттєвого практичного значення або дублює близькі сценарії функціонування підприємства. Крім того, надмірно велика база правил суттєво ускладнює інтерпретацію моделі та подальший процес її калібрування.

У зв'язку з цим у межах даного дослідження використовується скорочена експертна база правил, яка охоплює найбільш характерні сценарії взаємодії між ключовими компонентами системи управління підприємством. Такий підхід дозволяє забезпечити достатній рівень адекватності моделювання при збереженні структурної простоти та інтерпретованості моделі.

У межах верхнього рівня моделі використовуються такі вхідні змінні:

- Out1 – економічна результативність підприємства (рис. 4.9);
- Out2 – цифрова зрілість управління (рис. 4.10);
- Out3 – екологічна та біосферосумісна ефективність (рис. 4.11);
- Out4 – стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість (рис. 4.12);
- Out5 – організаційно-інноваційна стійкість (рис. 4.13).

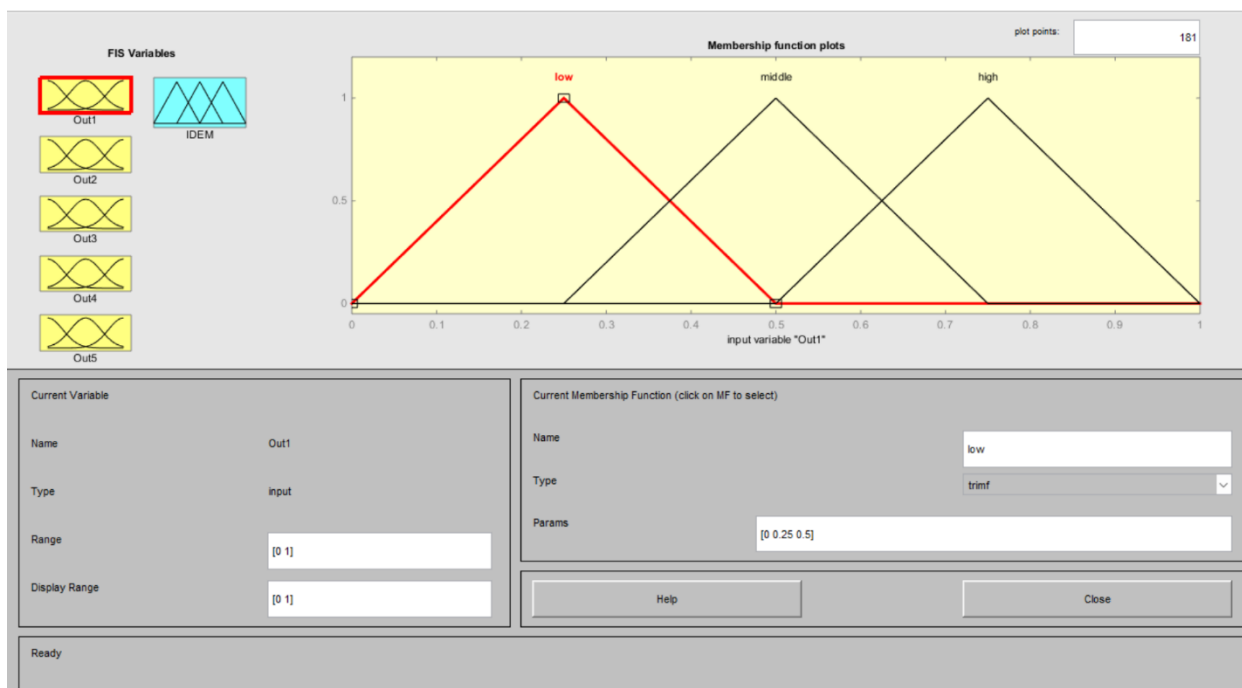


Рис. 4.9. Візуалізація вхідної змінної Out1 – економічна результативність підприємства

Джерело: розроблено автором.

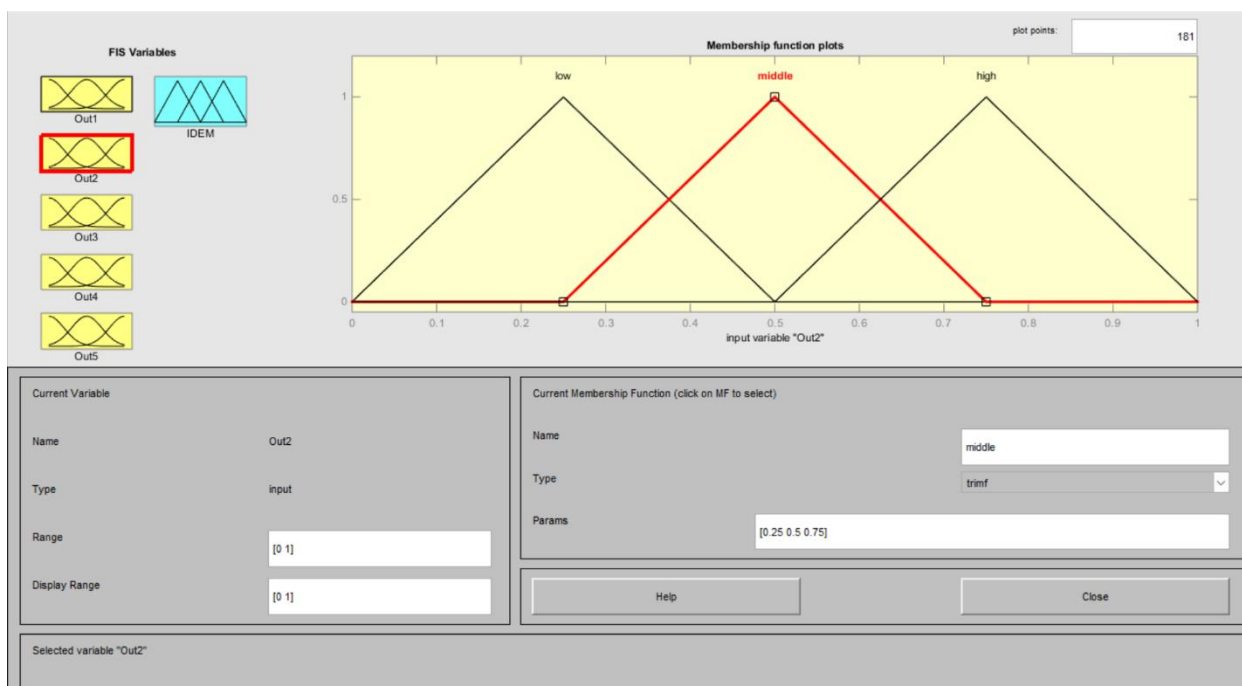


Рис. 4.10. Візуалізація вхідної змінної Out2 – цифрова зрілість управління

Джерело: розроблено автором.

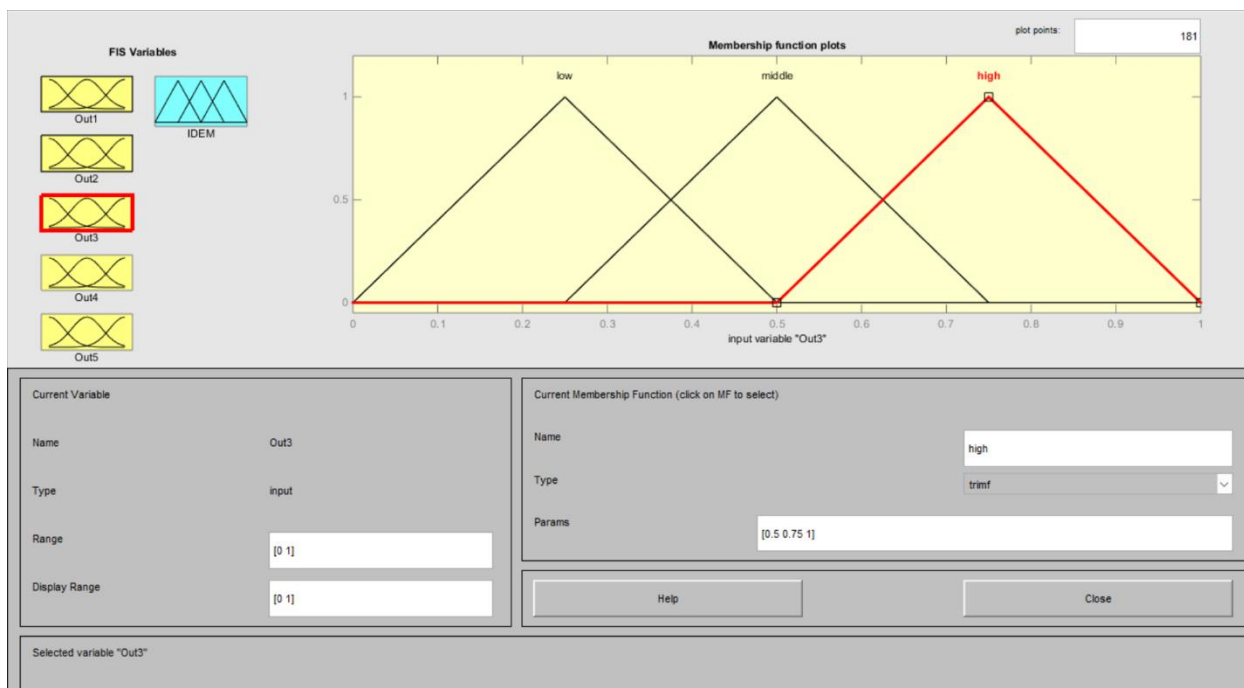


Рис. 4.11. Візуалізація вхідної змінної Out3 – екологічна та біосферосумісна ефективність

Джерело: розроблено автором.

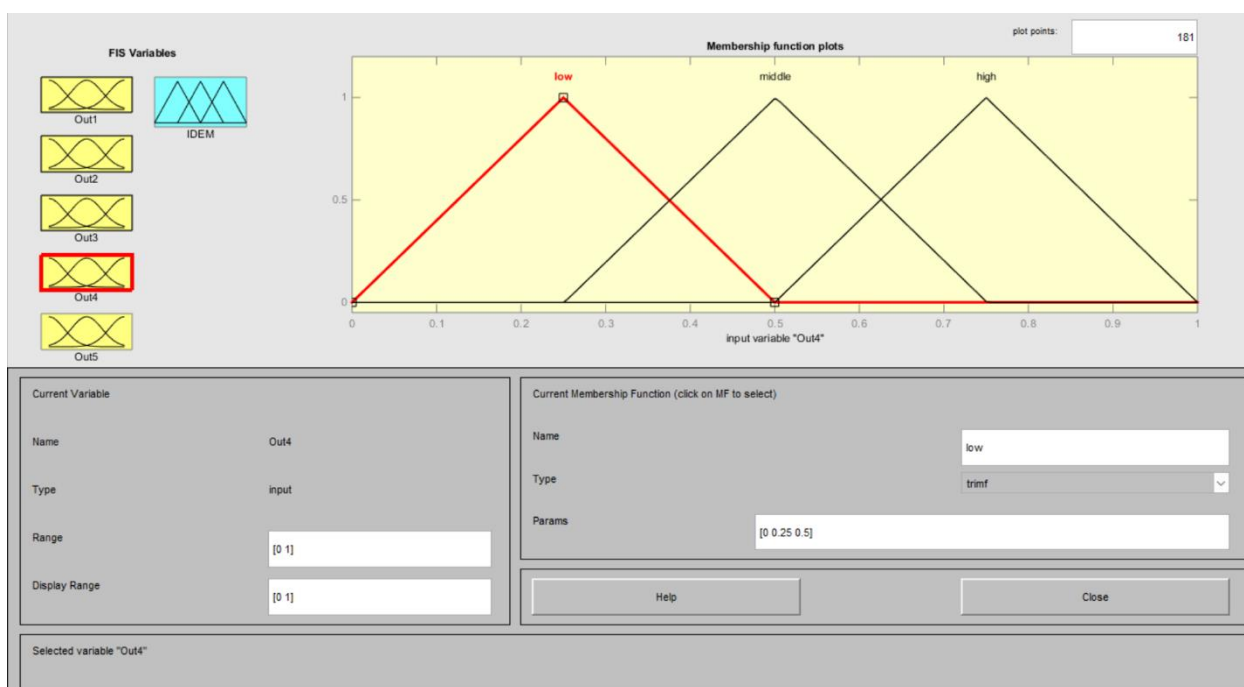


Рис. 4.12. Візуалізація вхідної змінної Out4 – стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість

Джерело: розроблено автором.

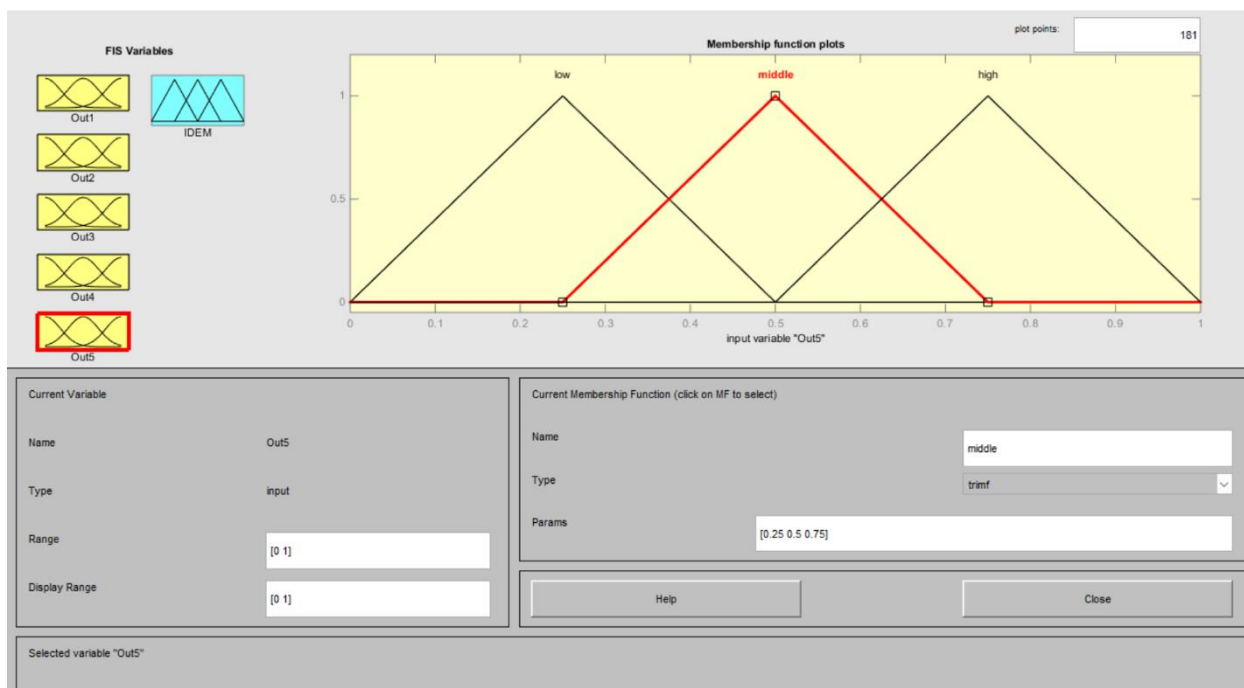


Рис. 4.13. Візуалізація вхідної змінної Out5 – організаційно-інноваційна стійкість

Джерело: розроблено автором.

Фінальний вихід IDEM також описується трьома базовими лінгвістичними термами: Low – низький рівень ефективності; Medium – середній рівень ефективності; High – високий рівень ефективності (рис. 4.14).

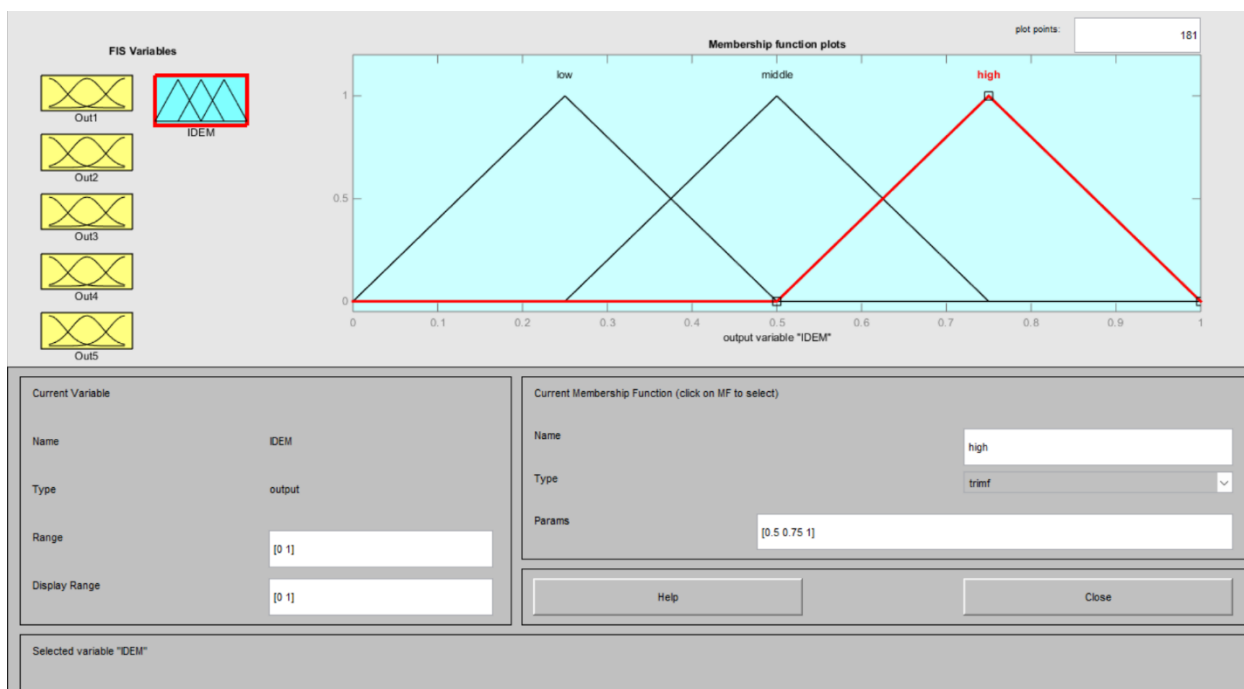


Рис. 4.14. Візуалізація вихідної змінної IDEM

Джерело: розроблено автором.

Формування правил базується на експертній логіці оцінювання сучасних систем управління будівельними підприємствами. Основна ідея полягає в тому, що високий рівень інтегральної ефективності можливий лише за умови збалансованого розвитку більшості функціональних компонентів системи. Водночас критично низькі значення окремих складових можуть суттєво знижувати загальний рівень ефективності незалежно від високих значень інших параметрів.

Базове правило найбільш сприятливого сценарію має вигляд:

IF Out1 is High AND Out2 is High AND Out3 is High AND Out4 is High AND Out5 is High THEN IDEM is High.

Дане правило відображає ситуацію, коли підприємство характеризується високою економічною результативністю, достатнім рівнем цифрової зрілості, екологічної відповідальності, ефективною взаємодією зі стейкхолдерами та високою організаційною стійкістю. Саме така комбінація параметрів відповідає концепції ефективного економіко-цифрового управління в умовах біосферосумісного розвитку.

Наступне правило описує ситуацію частково збалансованого розвитку:

IF Out1 is High AND Out2 is Medium AND Out3 is Medium AND Out4 is High AND Out5 is Medium THEN IDEM is Medium.

У даному випадку підприємство демонструє достатньо високий рівень економічної та соціальної ефективності, однак недостатня цифрова зрілість та організаційна стійкість обмежують загальний рівень інтегральної ефективності.

Особливе значення у межах верхнього рівня моделі мають правила, які враховують критичний вплив окремих компонентів. Наприклад:

IF Out1 is Low THEN IDEM is Low.

Таке правило базується на тому, що низький рівень економічної результативності суттєво обмежує можливість підтримання цифрової трансформації, реалізації ESG-стратегій та довгострокового розвитку підприємства.

Аналогічно важливим є вплив цифрової складової:

IF Out2 is Low AND Out5 is Low THEN IDEM is Low.

Це правило відображає ситуацію, коли недостатня цифрова зрілість у поєднанні з низькою організаційною адаптивністю унеможливорює ефективне функціонування підприємства в умовах цифрової економіки.

Окремі правила враховують екологічний компонент системи:

IF Out3 is High AND Out1 is Medium AND Out2 is Medium THEN IDEM is Medium.

У даному випадку високий рівень екологічної ефективності позитивно впливає на загальну систему управління, однак недостатня економічна та цифрова ефективність не дозволяє досягти високого рівня інтегрального показника.

Наступне правило описує вплив соціально-стейкхолдерної складової:

IF Out4 is High AND Out5 is High THEN IDEM is High.

Дане правило відображає ситуацію, коли ефективна взаємодія зі стейкхолдерами та високий рівень організаційної стійкості створюють сприятливе середовище для розвитку підприємства навіть за умов часткової нестабільності інших компонентів.

Окремі правила враховують типові сценарії середнього рівня розвитку:

IF Out1 is Medium AND Out2 is Medium AND Out3 is Medium AND Out4 is Medium AND Out5 is Medium THEN IDEM is Medium.

Таке правило описує підприємство зі стабільним, але недостатньо розвиненим рівнем економіко-цифрового управління.

Критично негативний сценарій описується правилом:

IF Out1 is Low AND Out2 is Low AND Out5 is Low THEN IDEM is Low.

У цьому випадку одночасно низька економічна результативність, цифрова зрілість та організаційна стійкість формують загальний низький рівень ефективності системи управління.

Також до бази правил включаються правила, які враховують позитивний вплив цифрової трансформації:

IF Out2 is High AND Out5 is High AND Out3 is Medium THEN IDEM is High.

Дане правило відображає ситуацію, коли високий рівень цифрової зрілості та організаційної адаптивності створює основу для ефективного розвитку підприємства навіть за умов середнього рівня екологічної ефективності.

Завершальне базове правило може описувати підприємства перехідного типу:

IF Out1 is Medium AND Out2 is High AND Out4 is Medium AND Out5 is Medium THEN IDEM is Medium.

У цьому випадку підприємство вже має достатньо високий рівень цифрової трансформації, однак інші компоненти системи ще не досягли необхідного рівня розвитку для формування високого інтегрального показника.

Таким чином, сформована база нечітких правил дозволяє описати найбільш характерні сценарії функціонування сучасного будівельного підприємства в умовах цифрової економіки та біосферосумісного розвитку. Використання скороченої експертної бази правил забезпечує достатній рівень адекватності моделювання, зберігаючи при цьому структурну простоту, інтерпретованість та можливість подальшого масштабування системи.

На наступному етапі виконується процедура нечіткого логічного висновку, в межах якої система визначає ступінь активації відповідних правил залежно від комбінації значень вхідних змінних. Далі результати роботи всіх активованих правил агрегуються у єдину нечітку множину фінального виходу IDEM.

Завершальним етапом є дефазифікація, тобто перетворення нечіткого виходу у чітке числове значення інтегрального індексу. Отримане значення IDEM характеризує загальний рівень ефективності економіко-цифрового управління підприємством та може використовуватися для:

- комплексного оцінювання діяльності підприємства;

- порівняльного аналізу різних підприємств;
- сценарного моделювання;
- підтримки управлінських рішень;
- аналізу ефективності цифрової трансформації;
- оцінювання рівня біосферосумісного розвитку;
- прогнозування стійкості підприємства.

Особливістю запропонованого підходу є його висока адаптивність та можливість подальшого масштабування. Архітектура моделі дозволяє доповнювати систему новими функціональними компонентами, змінювати структуру нечітких правил, інтегрувати додаткові критерії оцінювання та поєднувати нечітку логіку з іншими методами багатокритеріального аналізу, штучного інтелекту та цифрового моделювання.

4.2. Імітаційно-сценарне моделювання інтегрального індексу IDEM в умовах багатфакторної невизначеності

У процесі моделювання складних соціально-економічних та організаційно-управлінських систем однією з ключових проблем є наявність значної невизначеності вхідних параметрів. Для систем управління будівельними підприємствами така невизначеність є особливо характерною, оскільки діяльність підприємств залежить одночасно від фінансових, технологічних, екологічних, цифрових, кадрових та організаційних факторів. У межах запропонованої моделі IDEM ця проблема ускладнюється ще й тим, що сама система має багаторівневу нечітко-логічну структуру, у якій велика кількість змінних взаємодіє між собою нелінійним способом через базу нечітких правил. За таких умов використання лише одного детермінованого набору значень вхідних параметрів не дозволяє повноцінно оцінити поведінку моделі, її стійкість та чутливість до зміни умов функціонування підприємства.

Саме тому в сучасних дослідженнях дедалі ширше застосовуються методи імітаційного моделювання, які дозволяють формувати велику кількість

альтернативних сценаріїв розвитку системи. Такі підходи орієнтовані не на отримання одного фіксованого результату, а на формування певного простору можливих станів моделі. У межах цього підходу інтегральний індекс IDEM розглядається не як єдине статичне значення, а як випадкова величина, поведінка якої залежить від комбінацій вхідних параметрів та їх взаємного впливу.

Одним із найбільш ефективних інструментів такого аналізу є метод Latin Hypercube Sampling (LHS) [224, 227]. Даний підхід належить до класу методів статистичного імітаційного моделювання та використовується для генерації репрезентативних наборів вхідних даних у багатовимірному просторі параметрів. Метод був розроблений як удосконалення класичних процедур випадкового моделювання, насамперед традиційного Monte Carlo Simulation. Основна ідея LHS полягає у забезпеченні більш рівномірного покриття простору змінних при значно меншій кількості симуляцій [224-227].

Класичний метод Monte Carlo ґрунтується на випадковій генерації великої кількості значень параметрів відповідно до заданих розподілів. Незважаючи на універсальність такого підходу, він має певні обмеження. Насамперед це стосується нерівномірності вибірки. Навіть при великій кількості симуляцій деякі області простору параметрів можуть бути надмірно представленими, тоді як інші залишаються практично неохопленими. Для складних багатофакторних моделей це створює ризик викривлення результатів аналізу та зниження точності статистичних оцінок.

На відміну від традиційного Monte Carlo, метод Latin Hypercube Sampling використовує принцип стратифікованої вибірки [224]. Кожен діапазон зміни параметра попередньо поділяється на однакові інтервали ймовірності, після чого з кожного інтервалу випадковим чином обирається лише одне значення. Таким чином забезпечується рівномірне представлення всього діапазону зміни змінної. Далі отримані значення комбінуються між собою випадковим способом для формування повного набору сценаріїв моделювання.

У загальному вигляді процедура LHS може бути представлена як формування матриці вибірки [27]:

$$X = [x_{ij}]_{N \times k} \quad (4.27)$$

де: N – кількість сценаріїв моделювання; k – кількість вхідних параметрів; x_{ij} – значення j -го параметра в i -му сценарії.

Особливістю методу є те, що кожен інтервал кожної змінної використовується лише один раз у межах вибірки. У результаті забезпечується значно більш однорідне покриття простору параметрів порівняно з класичними випадковими методами генерації даних [227].

Для моделей із великою кількістю змінних ця властивість є критично важливою. У моделі IDEM використовується двадцять вхідних параметрів нижнього рівня та п'ять агрегованих показників верхнього рівня. Відповідно формується багатовимірний простір невизначеності, у якому кількість можливих комбінацій параметрів є надзвичайно великою. Використання традиційної випадкової генерації потребувало б дуже значної кількості симуляцій для забезпечення належної репрезентативності результатів. Натомість LHS дозволяє отримати стабільні статистичні характеристики моделі навіть при відносно меншій кількості сценаріїв.

Ще однією важливою перевагою методу є його висока ефективність при роботі з нелінійними системами. Нечітко-логічні моделі типу Mamdani характеризуються складною нелінійною структурою взаємозв'язків між змінними. Зміна одного параметра може по-різному впливати на вихід системи залежно від поточного стану інших змінних та активованих нечітких правил. У таких умовах традиційні аналітичні методи оцінки чутливості часто є недостатньо ефективними або взагалі непридатними.

Метод LHS дозволяє аналізувати поведінку системи без необхідності спрощення її структури. Кожен згенерований сценарій проходить через повну нечітко-логічну модель, включаючи етапи фазифікації, активації бази правил, агрегації та дефазифікації. У результаті формується множина значень

інтегрального індексу IDEM, яка відображає можливу поведінку системи управління підприємством в умовах невизначеності [227].

У межах даного дослідження метод Latin Hypercube Sampling виконує не лише функцію генерації даних, але й виступає інструментом дослідження стійкості управлінської системи. Це пов'язано з тим, що будівельні підприємства функціонують у середовищі високої мінливості зовнішніх умов. Коливання ринкової кон'юнктури, нестабільність інвестиційного середовища, зміни цифрових технологій, екологічні вимоги та ризики ресурсного забезпечення створюють складну систему взаємопов'язаних факторів впливу. Тому аналіз лише одного сценарію функціонування підприємства не дозволяє об'єктивно оцінити реальну ефективність системи управління [276].

Використання LHS дає можливість формувати широкий спектр альтернативних станів підприємства, що дозволяє оцінити:

- стабільність значень IDEM;
- чутливість системи до окремих параметрів;
- рівень ризику погіршення інтегрального індексу;
- наявність критичних комбінацій факторів;
- загальну адаптивність системи економіко-цифрового управління.

Окремої уваги заслуговує питання поєднання LHS із нечіткою логікою [229,231]. Традиційно методи статистичного моделювання працюють із точними числовими параметрами, тоді як Fuzzy Logic орієнтована на роботу з нечіткими лінгвістичними оцінками. Поєднання цих двох підходів дозволяє сформувати гібридну систему підтримки прийняття рішень, яка одночасно враховує як невизначеність даних, так і нечіткість управлінських оцінок.

У межах запропонованої моделі LHS використовується для генерації нормалізованих числових значень параметрів, після чого ці значення проходять процес фазифікації через трикутні функції належності. Таким чином статистична невизначеність перетворюється у нечітко-логічний простір оцінювання, де кожне значення параметра може одночасно частково належати до декількох лінгвістичних термів. Саме це забезпечує високу гнучкість та

адаптивність моделі IDEM до складних умов функціонування будівельних підприємств.

Отже, метод Latin Hypercube Sampling є важливим елементом запропонованої системи підтримки управлінських рішень [227-229]. Його використання дозволяє забезпечити репрезентативне покриття простору параметрів, підвищити достовірність статистичного аналізу, зменшити кількість необхідних симуляцій та підвищити якість оцінювання інтегрального індексу IDEM в умовах багатофакторної невизначеності [229].

Після побудови багаторівневої нечітко-логічної структури IDEM наступним етапом дослідження стало формування сценарного простору моделі для подальшого імітаційного аналізу. Необхідність цього етапу обумовлена тим, що інтегральний індекс ефективності економіко-цифрового управління не може розглядатися як статичний показник із фіксованим набором параметрів. Навпаки, його значення змінюється залежно від стану окремих підсистем підприємства, рівня цифрової зрілості, організаційної адаптивності, екологічної ефективності та економічної стійкості. У зв'язку з цим для дослідження поведінки моделі в умовах невизначеності було сформовано спеціальний сценарний простір на основі методу Latin Hypercube Sampling.

У межах даного дослідження генерація сценаріїв виконувалась не для всіх двадцяти первинних вхідних змінних нижнього рівня, а для агрегованих показників верхнього рівня моделі. Такий підхід дозволив суттєво знизити розмірність задачі без втрати логіки функціонування моделі. Кожен із показників Out1–Out5 уже є результатом узагальнення відповідної групи параметрів через окремі FIS-підсистеми. Тому використання саме агрегованих індикаторів у сценарному аналізі дозволяє зосередити увагу на поведінці інтегральної системи управління підприємством, а не на локальних варіаціях окремих первинних змінних.

Формування сценарного простору здійснювалося у нормалізованому діапазоні:

$$Out_i \in [0; 1] \quad (4.28)$$

де: Out_i – відповідний інтегрований показник верхнього рівня моделі.

Нормалізація параметрів забезпечила уніфікацію простору моделювання та дозволила коректно поєднувати різноманітні управлінські характеристики в єдиній нечітко-логічній системі. Крім того, саме такий формат є найбільш придатним для використання трикутних функцій належності та алгоритму Mamdani.

У процесі генерації сценаріїв кожен параметр $Out_1 - Out_5$ розглядався як незалежна змінна, для якої формувалася власний простір можливих значень. Метод Latin Hypercube Sampling забезпечував стратифіковане покриття кожного діапазону зміни параметра. Це дозволило уникнути надмірної концентрації сценаріїв у окремих частинах простору параметрів та забезпечити рівномірне представлення різних рівнів розвитку системи управління підприємством.

У межах проведеного дослідження було сформовано датасет, що містив 3334 сценарії функціонування системи економіко-цифрового управління підприємством.

У загальному вигляді структура сформованого набору даних може бути представлена як [35]:

$$D = \{Out_1, Out_2, Out_3, Out_4, Out_5\}_{3334} \quad (4.29)$$

де: D – сформований датасет сценаріїв; 3334 – кількість згенерованих комбінацій параметрів.

Кожен рядок сформованого датасету відповідав окремому сценарію функціонування підприємства в умовах певної комбінації економічних, цифрових, екологічних та організаційних характеристик. Після генерації сценаріїв усі набори параметрів послідовно передавалися на вхід верхнього рівня нечітко-логічної моделі для розрахунку інтегрального індексу IDEM.

Важливою особливістю сформованого сценарного простору є його багатовимірний характер. Навіть при використанні лише п'яти інтегрованих

параметрів кількість потенційних комбінацій є надзвичайно великою. У такому просторі традиційні детерміновані підходи до аналізу не дозволяють повною мірою дослідити поведінку системи. Саме тому застосування LHS забезпечило можливість ефективного аналізу широкого спектра можливих станів підприємства.

Сформований сценарний простір дозволив моделювати як сприятливі, так і кризові комбінації параметрів. Наприклад, окремі сценарії характеризувалися високим рівнем цифрової зрілості при низькій економічній стійкості, тоді як інші – навпаки, демонстрували економічну результативність за недостатнього рівня організаційної адаптивності або екологічної ефективності. Такий підхід дозволив дослідити не лише середні тенденції функціонування системи, а й її поведінку в умовах структурного дисбалансу між окремими складовими управління.

Окремої уваги заслуговує питання репрезентативності сформованого датасету. У методі Latin Hypercube Sampling якість результатів значною мірою залежить від рівномірності покриття простору параметрів. Саме тому процес генерації сценаріїв був орієнтований на забезпечення максимальної варіативності комбінацій Out1 – Out5. У результаті сформована вибірка охоплювала як низькі, так і середні та високі рівні всіх агрегованих показників, що дозволило забезпечити адекватне представлення різних типів управлінських ситуацій [36].

Сценарний простір, сформований у межах даного дослідження, виконував одразу декілька функцій. По-перше, він забезпечував основу для статистичного аналізу поведінки інтегрального індексу IDEM. По-друге, дозволяв оцінити чутливість моделі до зміни окремих параметрів. По-третє, створював базу для подальшого використання методів машинного навчання та побудови прогностичних моделей. Фактично сформований датасет виступав цифровим середовищем експериментального дослідження системи економіко-цифрового управління підприємством.

Крім того, використання великої кількості сценаріїв дало можливість мінімізувати вплив випадкових комбінацій параметрів на підсумкові результати аналізу. Це особливо важливо для гібридних нечітко-логічних систем, де структура бази правил може формувати складні нелінійні залежності між параметрами. Завдяки цьому отримані результати моделювання характеризуються більшою статистичною стійкістю та достовірністю.

Після формування сценарного простору моделі IDEM та генерації множини сценаріїв за допомогою методу Latin Hypercube Sampling наступним етапом дослідження став статистичний аналіз отриманих результатів моделювання. Основною метою цього етапу є оцінювання загальної поведінки інтегрального індексу IDEM в умовах варіативності параметрів системи економіко-цифрового управління підприємством.

На відміну від детермінованих моделей, де результат розглядається як одне фіксоване значення, у межах імітаційного моделювання інтегральний показник IDEM формується у вигляді певного статистичного розподілу. Кожен сценарій, сформований методом LHS, створює окрему комбінацію значень параметрів Out1–Out5, які після проходження через верхній рівень нечітко-логічної системи формують відповідне значення інтегрального індексу. У результаті виникає множина значень IDEM, що характеризує можливі стани системи управління підприємством.

Для інтерпретації отриманого розподілу використовуються базові статистичні характеристики, які дозволяють оцінити центральну тенденцію, варіативність та межі зміни інтегрального індексу.

Одним із базових статистичних показників є середнє значення інтегрального індексу. Воно характеризує усереднений рівень ефективності функціонування системи управління за всіма згенерованими сценаріями. Середнє значення визначається як арифметичне усіх отриманих результатів моделювання:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.30)$$

де: $\bar{x}$ – середнє значення показника; x_i – значення показника в i -му сценарії; n – кількість сценаріїв моделювання.

У контексті моделі IDEM середнє значення дозволяє оцінити загальний очікуваний рівень ефективності економіко-цифрового управління підприємством. Чим вищим є значення цього показника, тим більш стабільною та збалансованою є система управління в середньому по всьому простору сценаріїв.

Разом із середнім значенням важливу роль відіграє медіана розподілу. На відміну від середнього, медіана менш чутлива до крайніх або аномальних значень і дозволяє оцінити центральне положення вибірки з точки зору порядкового розташування значень. Медіана визначається як значення, що поділяє впорядкований набір даних на дві рівні частини:

$$Med(x) = x_{\frac{n+1}{2}} \quad (4.31)$$

для непарної кількості спостережень, або:

$$Med(x) = \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}}{2} \quad (4.32)$$

для парної кількості спостережень.

У межах аналізу IDEM медіана дозволяє визначити типовий рівень функціонування системи управління. Якщо медіана є близькою до середнього значення, це свідчить про відносну симетричність розподілу результатів моделювання. Значні відмінності між цими показниками можуть свідчити про наявність асиметрії або впливу окремих екстремальних сценаріїв.

Наступним важливим елементом статистичного аналізу є оцінювання варіативності результатів моделювання. Для цього використовується стандартне відхилення, яке характеризує ступінь розсіювання значень відносно середнього рівня. Формально стандартне відхилення визначається як:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.33)$$

де: σ – стандартне відхилення; x_i – значення показника; $\bar{x}$ – середнє значення; n – кількість сценаріїв.

Для моделі IDEM стандартне відхилення має особливе значення, оскільки дозволяє оцінити стійкість системи управління до зміни умов функціонування підприємства. Невелике значення стандартного відхилення свідчить про стабільність інтегрального індексу та низьку чутливість системи до варіацій параметрів Out1–Out5. Водночас високі значення цього показника можуть свідчити про підвищену нестабільність системи або значний вплив окремих факторів на результати моделювання.

Для повнішого аналізу поведінки системи також використовуються мінімальне та максимальне значення розподілу. Мінімальне значення характеризує найгірший із отриманих сценаріїв функціонування системи управління:

$$x_{min} = \min (x_i) \quad (4.34)$$

Максимальне значення, відповідно, відображає найбільш сприятливий сценарій:

$$x_{max} = \max (x_i) \quad (4.35)$$

Аналіз цих показників дозволяє оцінити межі потенційної поведінки інтегрального індексу IDEM у сформованому сценарному просторі. Для систем підтримки управлінських рішень це має важливе практичне значення, оскільки дозволяє оцінити як ризики погіршення стану підприємства, так і потенційні можливості досягнення високої ефективності управління.

На основі мінімального та максимального значення додатково визначається діапазон зміни показника:

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (4.36)$$

де: R – діапазон зміни результатів моделювання.

Діапазон дозволяє оцінити загальний масштаб варіативності інтегрального індексу. У контексті IDEM цей показник характеризує ширину простору можливих станів системи управління підприємством. Чим більшим є діапазон, тим більш чутливою є система до зміни параметрів та умов функціонування.

Додатково для поглибленого аналізу розподілу результатів моделювання в межах даного дослідження використовуються перцентильні характеристики. На відміну від середнього значення або стандартного відхилення, перцентилі дозволяють оцінити структуру розподілу результатів та визначити положення окремих груп сценаріїв у загальному просторі моделювання. Це особливо важливо для складних нечітко-логічних систем, у яких результати можуть мати нерівномірний або асиметричний розподіл.

У загальному вигляді перцентиль визначає таке значення показника, нижче якого знаходиться певний відсоток спостережень. Формально p -й перцентиль може бути представлений як:

$$P_p = x_{\left(\frac{p}{100}(n+1)\right)} \quad (4.37)$$

де: P_p – p -й перцентиль; p – відсотковий рівень перцентилі; n – кількість спостережень; x – впорядковані значення вибірки.

У межах даного дослідження для аналізу результатів моделювання використовуються 25-й, 75-й та 95-й перцентилі.

Перцентиль 25% характеризує нижню частину розподілу результатів та визначає значення, нижче якого знаходиться 25% усіх сценаріїв моделювання. Даний показник дозволяє оцінити рівень функціонування системи в умовах відносно несприятливих сценаріїв. У контексті моделі IDEM це дає можливість визначити нижню межу типових значень інтегрального індексу без урахування екстремальних випадків. Якщо значення P_{25} є відносно високим, це свідчить про достатню стійкість системи управління навіть у менш сприятливих умовах.

Перцентиль 75%, навпаки, характеризує верхню частину розподілу та визначає значення, нижче якого знаходиться 75% результатів моделювання. Цей показник використовується для оцінювання верхнього рівня типових сценаріїв функціонування підприємства. У поєднанні з перцентилем 25% він дозволяє визначити міжквартильний інтервал, який характеризує центральну область розподілу результатів:

$$IQR = P_{75} - P_{25} \quad (4.38)$$

де: IQR – міжквартильний розмах.

Міжквартильний інтервал є важливим показником стабільності системи, оскільки дозволяє оцінити концентрацію основної маси результатів моделювання. Невелике значення IQR свідчить про високу однорідність сценаріїв та стабільність інтегрального індексу IDEM. Водночас широкий міжквартильний діапазон може вказувати на значну варіативність поведінки системи управління.

Особливе значення у межах аналізу ризиків має перцентиль 95%, який визначає межу, нижче якої знаходиться 95% усіх сценаріїв. Даний показник дозволяє оцінити верхню межу розподілу результатів та ідентифікувати сценарії з максимально високими значеннями інтегрального індексу IDEM. У системах підтримки управлінських рішень цей перцентиль використовується для аналізу потенційно найбільш ефективних сценаріїв функціонування підприємства.

Крім того, перцентиль 95% має важливе значення з точки зору оцінювання надійності та стійкості моделі. Якщо навіть верхні 5% сценаріїв не демонструють критично високих відхилень від основного масиву результатів, це може свідчити про стабільність нечітко-логічної системи та відсутність різких нелінійних стрибків у поведінці інтегрального індексу.

Використання перцентильного аналізу є особливо доцільним для моделей, побудованих на основі Latin Hypercube Sampling. Це пов'язано з тим, що LHS забезпечує рівномірне покриття простору параметрів, а отже отримані

перцентилі більш адекватно відображають структуру розподілу результатів моделювання. На відміну від окремих випадкових екстремальних значень, перцентильні характеристики дозволяють оцінити типові межі поведінки системи без надмірного впливу одиничних аномальних сценаріїв.

У межах даного дослідження перцентильний аналіз виступає важливим інструментом оцінювання стійкості економіко-цифрового управління будівельними підприємствами. Поєднання середніх характеристик із перцентильними оцінками дозволяє комплексно аналізувати не лише центральні тенденції, але й структуру розподілу інтегрального індексу IDEM у просторі змодельованих сценаріїв. Одним із ключових показників стабільності результатів моделювання є коефіцієнт варіації. На відміну від стандартного відхилення, яке характеризує абсолютний рівень розсіювання значень, коефіцієнт варіації дозволяє оцінити відносний рівень мінливості показника щодо його середнього значення. Це особливо важливо при аналізі інтегральних індексів, нормалізованих у діапазоні $[0; 1]$, де необхідно оцінити не лише абсолютні коливання, але й їх масштаб відносно середнього рівня функціонування системи.

Коефіцієнт варіації визначається за формулою:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (4.39)$$

де: CV – коефіцієнт варіації; σ – стандартне відхилення; $\bar{x}$ – середнє значення показника.

У деяких випадках коефіцієнт варіації подається у відсотках:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% \quad (4.40)$$

У контексті моделі IDEM коефіцієнт варіації характеризує рівень стійкості інтегрального індексу до зміни параметрів сценарного простору. Низькі значення цього показника свідчать про високу стабільність системи економіко-цифрового управління та відносно незначний вплив варіативності параметрів Out1–Out5 на кінцевий результат. Водночас збільшення

коефіцієнта варіації може свідчити про підвищену чутливість системи до зміни окремих факторів або про наявність нестабільних режимів функціонування моделі.

Для аналізу форми розподілу результатів моделювання використовується коефіцієнт асиметрії. Даний показник дозволяє оцінити ступінь симетричності розподілу відносно середнього значення. У системах імітаційного моделювання це має важливе значення, оскільки асиметрія може свідчити про домінування певного типу сценаріїв або про наявність нелінійних ефектів у структурі моделі.

Коефіцієнт асиметрії визначається як:

$$Sk = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^3 \quad (4.41)$$

де: Sk – коефіцієнт асиметрії; x_i – значення показника в i -му сценарії; $\bar{x}$ – середнє значення; σ – стандартне відхилення; n – кількість сценаріїв.

Значення коефіцієнта асиметрії дозволяє оцінити напрям зміщення розподілу. Якщо: $Sk = 0$, розподіл є симетричним; $Sk > 0$, розподіл має правосторонню асиметрію; $Sk < 0$, розподіл характеризується лівосторонньою асиметрією.

Для моделі IDEM позитивна асиметрія може свідчити про наявність окремих сценаріїв із дуже високими значеннями інтегрального індексу, тоді як основна маса результатів концентрується на нижчих рівнях. Від’ємна асиметрія, навпаки, може вказувати на домінування сценаріїв із високою ефективністю управління та наявність лише окремих несприятливих комбінацій параметрів.

Особливу цінність коефіцієнт асиметрії має при аналізі нечітко-логічних систем, де структура бази правил може формувати нерівномірну реакцію моделі на зміни вхідних параметрів. У таких умовах навіть рівномірно згенерований простір сценаріїв може створювати асиметричний розподіл вихідних результатів.

Для оцінювання концентрації значень навколо середнього та аналізу «гостроти» розподілу використовується ексцес. Даний показник дозволяє визначити, наскільки результати моделювання схильні до формування екстремальних значень або, навпаки, до концентрації навколо центральної області розподілу.

Ексцес визначається за формулою:

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^4 - 3 \quad (4.42)$$

де: K – ексцес розподілу.

Віднімання числа 3 використовується для порівняння отриманого розподілу з нормальним законом розподілу, для якого ексцес дорівнює нулю.

Інтерпретація ексцесу виконується таким чином:

- $K = 0$ – розподіл близький до нормального;
- $K > 0$ – розподіл має загострену форму та характеризується більшою концентрацією значень біля середнього й підвищеною ймовірністю екстремальних сценаріїв;
- $K < 0$ – розподіл є більш плоским, а значення рівномірніше розподілені по всьому діапазону.

У контексті аналізу IDEM ексцес дозволяє оцінити характер поведінки інтегрального індексу в просторі сценаріїв. Високі значення ексцесу можуть свідчити про нестійкість системи та появу окремих критичних або надзвичайно ефективних сценаріїв. Натомість низький або від’ємний ексцес вказує на більш рівномірну поведінку моделі та відсутність різких відхилень результатів.

Комплексне використання коефіцієнта варіації, асиметрії та ексцесу дозволяє значно глибше дослідити поведінку моделі IDEM порівняно з використанням лише базових статистичних характеристик. Дані показники формують основу для оцінювання стабільності системи економіко-цифрового

управління, аналізу ризиків та інтерпретації поведінки інтегрального індексу в умовах багатфакторної невизначеності.

Для підвищення достовірності статистичної інтерпретації результатів моделювання в межах дослідження також використовується аналіз довірчих інтервалів середнього значення інтегрального індексу IDEM. На відміну від простого середнього значення, яке характеризує лише центральну тенденцію вибірки, довірчий інтервал дозволяє оцінити статистичну надійність отриманих результатів та визначити межі, у яких із заданою ймовірністю знаходиться істинне середнє значення досліджуваного показника.

У задачах імітаційного моделювання це має особливе значення, оскільки результати формуються на основі великої кількості сценаріїв, згенерованих у просторі невизначеності. Навіть при використанні методів стратифікованої вибірки, таких як Latin Hypercube Sampling, отримане середнє значення є оцінкою, яка залежить від структури сформованої вибірки. Саме тому додаткове визначення довірчих меж дозволяє оцінити стабільність та статистичну надійність результатів моделювання.

У межах даного дослідження використовується 95% довірчий інтервал середнього значення. Це означає, що з імовірністю 95% істинне середнє значення інтегрального індексу IDEM знаходиться в межах розрахованого інтервалу.

Загальна формула довірчого інтервалу середнього має вигляд:

$$CI_{95\%} = \bar{x} \pm z \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.43)$$

де: $CI_{95\%}$ - 95% довірчий інтервал; $\bar{x}$ – середнє значення вибірки; z – критичне значення нормального розподілу; σ – стандартне відхилення; n – кількість сценаріїв моделювання.

Для 95% довірчого рівня використовується значення:

$$z = 1,96$$

На основі цієї формули визначаються нижня та верхня межі довірчого інтервалу.

Нижня межа довірчого інтервалу визначається як:

$$CI_{95\%}^{-} = \bar{x} - 1,96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.44)$$

Даний показник характеризує мінімальне значення, у межах якого з імовірністю 95% може знаходитися істинне середнє значення інтегрального індексу IDEM.

Верхня межа довірчого інтервалу визначається за формулою:

$$CI_{95\%}^{+} = \bar{x} + 1,96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.45)$$

Це значення визначає верхню межу можливого розташування істинного середнього значення показника.

У межах статистичного аналізу результатів моделювання нижня та верхня межі довірчого інтервалу дозволяють оцінити рівень статистичної стійкості моделі IDEM. Вузький довірчий інтервал свідчить про високу надійність оцінки середнього значення та стабільність результатів симуляції. Натомість широкий інтервал може вказувати на значну варіативність сценаріїв або недостатню однорідність розподілу результатів.

Для більш детального аналізу точності оцінювання додатково визначаються верхня та нижня похибки. Вони характеризують відстань від середнього значення до відповідної межі довірчого інтервалу.

Нижня похибка визначається як:

$$\Delta^{-} = \bar{x} - CI_{95\%}^{-} \quad (4.46)$$

Верхня похибка, відповідно, визначається як:

$$\Delta^{+} = CI_{95\%}^{+} - \bar{x} \quad (4.47)$$

Для симетричного нормального розподілу значення верхньої та нижньої похибок є однаковими. Однак у складних системах імітаційного моделювання, особливо при аналізі нелінійних нечітко-логічних моделей, можливе виникнення несиметричних розподілів результатів. У таких випадках верхня

та нижня похибки можуть відрізнятись, що свідчить про наявність асиметрії або нерівномірної концентрації сценаріїв у просторі результатів.

У контексті моделі IDEM аналіз довірчих інтервалів має важливе практичне значення. Оскільки інтегральний індекс використовується як інструмент підтримки управлінських рішень, важливо оцінити не лише саме значення показника, але й рівень невизначеності цієї оцінки. Довірчі межі дозволяють визначити, наскільки стабільною є система економіко-цифрового управління підприємством у межах сформованого сценарного простору.

Крім того, аналіз довірчих інтервалів дозволяє оцінити якість сформованого датасету та ефективність використання Latin Hypercube Sampling. Якщо навіть при великій кількості сценаріїв довірчі межі залишаються вузькими, це свідчить про високу репрезентативність вибірки та достатню стабільність статистичних характеристик моделі.

Для нечітко-логічних систем це має особливе значення через нелінійний характер Mamdani та складну структуру бази правил. Активація різних комбінацій нечітких правил може створювати локальні області підвищеної варіативності результатів, що безпосередньо впливає на ширину довірчих інтервалів. Саме тому використання довірчих оцінок дозволяє більш глибоко дослідити поведінку інтегрального індексу IDEM та оцінити ступінь стабільності системи управління в умовах багатофакторної невизначеності.

Особливістю статистичного аналізу в межах даного дослідження є його тісна інтеграція з нечітко-логічною структурою моделі. У класичних статистичних задачах аналіз зазвичай виконується для систем із лінійними або слабо нелінійними залежностями. Натомість модель IDEM базується на алгоритмі Mamdani та складній базі нечітких правил, де взаємозв'язки між параметрами мають нелінійний характер. У таких умовах навіть незначні зміни окремих показників можуть призводити до активації різних груп нечітких правил та формування різних результатів дефазифікації.

Саме тому статистичний аналіз у межах даної роботи виконує не лише описову функцію, а й дозволяє оцінити поведінку нечітко-логічної системи в

умовах багатофакторної невизначеності. Отримані характеристики формують основу для подальшого аналізу стійкості моделі, оцінювання чутливості параметрів та інтерпретації ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами.

Після формування сценарного простору моделі та виконання статистичного аналізу результатів моделювання наступним етапом дослідження став аналіз чутливості інтегрального індексу IDEM до зміни параметрів верхнього рівня моделі. Основною метою даного етапу є визначення ступеня впливу окремих компонентів системи економіко-цифрового управління на кінцевий результат функціонування моделі, а також оцінювання стійкості інтегрального індексу в умовах багатофакторної невизначеності.

У загальному вигляді чутливість системи характеризує ступінь зміни вихідного параметра у відповідь на зміну вхідних змінних. Для аналізу взаємозв'язку між показниками Out1–Out5 та інтегральним індексом IDEM у межах дослідження використовується кореляційний аналіз.

Кореляційний аналіз дозволяє оцінити силу та напрям статистичного взаємозв'язку між параметрами моделі. Найчастіше для цього використовується коефіцієнт лінійної кореляції Пірсона:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.48)$$

де: r_{xy} – коефіцієнт кореляції між змінними; x_i – значення вхідного параметра; y_i – значення інтегрального індексу IDEM; $\bar{x}$, $\bar{y}$ – середні значення відповідних змінних; n – кількість сценаріїв моделювання.

Значення коефіцієнта кореляції знаходиться в інтервалі $r \in [-1; 1]$, де: $r \approx 1$ свідчить про сильний прямий зв'язок; $r \approx -1$ характеризує сильний обернений зв'язок; $r \approx 0$ вказує на відсутність вираженої лінійної залежності.

У межах аналізу IDEM позитивні значення коефіцієнта кореляції свідчать про те, що збільшення відповідного показника Out1–Out5 сприяє

зростанню інтегрального індексу. Чим вищим є значення коефіцієнта, тим сильніше відповідний фактор впливає на загальну ефективність економіко-цифрового управління підприємством.

Кореляційний аналіз дозволяє визначити найбільш критичні фактори системи. Параметри, які демонструють найвищий рівень зв'язку з IDEM, можуть розглядатися як ключові драйвери ефективності управління. Водночас змінні з низьким рівнем кореляції можуть свідчити або про менший вплив на інтегральний індекс, або про складні нелінійні взаємозалежності, які не описуються лінійною моделлю кореляції.

У межах даного дослідження аналіз чутливості також використовується для оцінювання стійкості системи управління підприємством. Стійкість моделі характеризує її здатність зберігати відносно стабільні результати при зміні параметрів сценарного простору. Якщо навіть суттєві зміни окремих показників Out1–Out5 не призводять до різких коливань інтегрального індексу IDEM, це може свідчити про високу адаптивність системи економіко-цифрового управління.

Навпаки, надмірно висока чутливість до окремих параметрів може вказувати на потенційні ризики нестабільності. У таких випадках функціонування підприємства стає критично залежним від певної групи факторів. Наприклад, надмірна залежність IDEM від економічної результативності може означати недостатню компенсаційну роль цифрових або організаційних компонентів системи. Аналогічно надмірний вплив цифрової зрілості може свідчити про структурний дисбаланс між технологічними та управлінськими складовими моделі.

З управлінської точки зору результати аналізу чутливості дозволяють визначити пріоритетні напрями розвитку системи управління підприємством. Фактори з найбільшим впливом на IDEM можуть розглядатися як стратегічні точки управлінського впливу. Саме на них доцільно концентрувати ресурси підприємства для підвищення загальної ефективності економіко-цифрового управління.

Крім того, аналіз чутливості дозволяє оцінити збалансованість структури моделі. Якщо інтегральний індекс формується переважно під впливом одного або двох факторів, це може свідчити про недостатню системність моделі. Натомість відносно рівномірний вплив усіх компонентів Out1–Out5 вказує на комплексний характер системи управління та підтверджує багатофакторну природу інтегрального індексу IDEM.

Для поглибленого аналізу структури моделі IDEM додатково було виконано оцінювання кореляційних залежностей між агрегованими показниками верхнього рівня Out1–Out5. Проведений аналіз дозволяє визначити ступінь взаємозв'язку між окремими складовими системи економіко-цифрового управління та оцінити рівень їх взаємної узгодженості в межах сформованого сценарного простору.

Кореляційна матриця відображає силу та напрям статистичних залежностей між економічною результативністю підприємства, цифровою зрілістю управління, екологічною ефективністю, стейкхолдерно-людиноцентричною орієнтованістю та організаційно-інноваційною стійкістю. Отримані результати дозволяють оцінити, наскільки окремі компоненти моделі змінюються узгоджено та чи формують вони взаємопов'язану систему управління.

Наявність позитивних кореляцій між показниками може свідчити про системний характер розвитку підприємства, коли покращення однієї складової супроводжується зростанням інших компонентів управління. Водночас слабкі або близькі до нуля кореляції можуть вказувати на відносну автономність окремих підсистем або наявність складних нелінійних взаємозалежностей у структурі нечітко-логічної моделі.

З позиції аналізу стійкості моделі отримана кореляційна матриця також дозволяє оцінити рівень збалансованості структури IDEM та визначити потенційні групи факторів, між якими формуються найбільш тісні взаємозв'язки.

Таким чином, статистичний аналіз результатів моделювання є важливим етапом дослідження інтегрального індексу IDEM. Використання базових статистичних характеристик дозволяє комплексно оцінити центральні тенденції, межі зміни та рівень стабільності системи управління, а також створює основу для подальшого поглибленого аналізу поведінки моделі в умовах невизначеності.

4.3. Нейромережеве моделювання та формування предиктивного модуля підтримки управлінських рішень за індексом IDEM

У сучасних умовах цифрової трансформації економіки та ускладнення управлінських процесів усе більшого значення набувають інтелектуальні методи аналізу даних, здатні працювати зі складними багатофакторними системами, високим рівнем невизначеності та нелінійними взаємозв'язками між показниками. Особливо актуальним це є для сфери управління будівельними підприємствами, де ефективність прийняття рішень залежить одночасно від економічних, організаційних, екологічних, цифрових і соціальних факторів. У таких умовах традиційні аналітичні моделі часто виявляються недостатньо гнучкими для опису реальних процесів, оскільки вони переважно орієнтовані на лінійні залежності або потребують жорстко формалізованих математичних припущень. Саме тому одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сучасних систем підтримки прийняття рішень є використання штучних нейронних мереж.

Штучні нейронні мережі (Artificial Neural Networks, ANN) являють собою математичні та алгоритмічні структури, створені за аналогією з принципами функціонування біологічної нервової системи людини [231, 238]. Основна ідея ANN полягає у формуванні системи взаємопов'язаних обчислювальних елементів – штучних нейронів, які здатні обробляти інформацію, виявляти приховані закономірності та адаптуватися до даних у процесі навчання. На відміну від класичних статистичних моделей, штучні

нейронні мережі не потребують жорсткого задання функціональної форми залежностей між змінними, оскільки здатні самостійно апроксимувати складні багатовимірні взаємозв'язки.

Базовою структурною одиницею ANN є штучний нейрон [39]. Кожен нейрон отримує певний набір вхідних сигналів, які множаться на відповідні вагові коефіцієнти, після чого формується інтегральний сигнал [40]. Отримане значення проходить через функцію активації, що визначає вихід нейрона та передає інформацію до наступних елементів мережі. Таким чином, нейронна мережа являє собою багаторівневу систему обробки інформації, де знання моделі фактично зберігаються у значеннях вагових коефіцієнтів між нейронами.

Типова архітектура штучної нейронної мережі складається з трьох основних типів шарів: вхідного шару, одного або декількох прихованих шарів та вихідного шару [232]. Вхідний шар виконує функцію приймання початкових даних моделі.

У контексті дослідження інтегрального індексу IDEM такими даними можуть виступати агреговані показники економічної результативності, цифрової зрілості, екологічної ефективності, стейкхолдерної орієнтованості та організаційної стійкості підприємства. Вихідний шар формує фінальний результат прогнозування, тобто інтегральне значення IDEM.

Особливу роль у функціонуванні ANN відіграють приховані шари [44]. Саме вони забезпечують здатність нейронної мережі виявляти складні нелінійні закономірності між вхідними та вихідними параметрами системи [232]. Кожен прихований шар виконує послідовне перетворення інформації, формуючи нові абстрактні представлення даних. Якщо мережа не містить прихованих шарів, її можливості обмежуються апроксимацією лише лінійних залежностей. Натомість використання багат шарової структури дозволяє ANN ефективно працювати з багат факторними процесами, де взаємозв'язки між показниками мають складний, нелінійний та часто нечітко виражений характер. У задачах економічного та управлінського моделювання приховані

шари відіграють особливо важливу роль, оскільки реальні системи управління підприємствами характеризуються високим рівнем взаємозалежності між показниками [239, 240, 241, 248]. Наприклад, підвищення цифрової зрілості підприємства може впливати не лише на швидкість обробки інформації, але й на економічну ефективність, екологічні показники, рівень адаптивності управління та стейкхолдерну взаємодію. Такі взаємозалежності складно формалізувати за допомогою традиційних математичних моделей, проте вони можуть бути виявлені та апроксимовані нейронною мережею у процесі навчання.

Однією з ключових особливостей ANN є здатність до навчання. Процес навчання полягає у поступовому коригуванні вагових коефіцієнтів нейронної мережі з метою мінімізації помилки між фактичними та прогнозованими значеннями. Під час навчання мережа аналізує велику кількість прикладів, виявляє закономірності у даних та адаптує внутрішню структуру для досягнення максимальної точності прогнозування.

У більшості сучасних ANN використовується алгоритм зворотного поширення помилки (Backpropagation) [233]. Його сутність полягає у тому, що після отримання прогнозованого результату система визначає величину помилки та послідовно коригує вагові коефіцієнти у зворотному напрямку – від вихідного шару до вхідного. У результаті кожна наступна ітерація навчання забезпечує поступове підвищення точності моделі. Процес повторюється багаторазово до моменту досягнення стабільного рівня помилки або заданого критерію збіжності.

Ефективність навчання ANN значною мірою залежить від функцій активації, які використовуються у нейронах прихованих та вихідних шарів [232]. Функція активації визначає характер перетворення вхідного сигналу та забезпечує нелінійність моделі. Саме завдяки нелінійним функціям активації нейронні мережі здатні моделювати складні взаємозалежності між змінними.

У сучасних нейронних мережах найбільш поширеними є функції активації sigmoid, tanh та ReLU. Сигмоїдна функція забезпечує плавне

перетворення значень у діапазоні від 0 до 1 та історично широко використовувалася у задачах класифікації та прогнозування. Гіперболічний тангенс дозволяє формувати вихідні значення у діапазоні від -1 до 1 , що покращує процес навчання у певних типах моделей. Однією з найбільш ефективних сучасних функцій є ReLU (Rectified Linear Unit), яка характеризується високою швидкістю обчислень та зменшує проблему зникнення градієнтів під час навчання глибоких мереж [234].

У контексті задач прогнозування інтегрального індексу IDEM використання ANN є особливо доцільним через складний нелінійний характер взаємодії між компонентами моделі. Показники економічної результативності, цифрової зрілості, екологічної ефективності та організаційної стійкості не формують простих пропорційних залежностей. Вплив окремих факторів може змінюватися залежно від комбінації інших параметрів системи, а сама структура взаємозв'язків характеризується високим рівнем невизначеності. Штучні нейронні мережі дозволяють враховувати такі особливості та формувати більш адаптивні моделі прогнозування.

Важливою перевагою ANN є також здатність працювати з великими масивами даних та забезпечувати високу узагальнюючу здатність моделі. На відміну від традиційних регресійних підходів, нейронні мережі можуть ефективно обробляти багатовимірні набори даних із великою кількістю прихованих залежностей. Це особливо важливо для задач цифрового управління підприємствами, де кількість параметрів та взаємозв'язків між ними постійно зростає.

У сучасних системах підтримки прийняття рішень штучні нейронні мережі активно використовуються для прогнозування економічних показників, оцінювання ризиків, моделювання фінансової стійкості, аналізу інвестиційної привабливості, прогнозування попиту, оптимізації ресурсного забезпечення та оцінювання ефективності управлінських стратегій [254]. У сфері будівництва ANN застосовуються також для прогнозування тривалості

реалізації проєктів, оцінювання технічного стану об'єктів, аналізу ризиків будівельного виробництва, оптимізації логістичних процесів та підтримки стратегічного управління підприємствами.

Окремої уваги заслуговує інтеграція штучних нейронних мереж із нечіткою логікою. Поєднання Fuzzy Logic та ANN дозволяє об'єднати переваги обох підходів. Нечітка логіка забезпечує інтерпретованість моделі та можливість формалізації експертних знань, тоді як нейронні мережі надають системі здатність до самонавчання та адаптації до нових даних. У результаті формується гібридна інтелектуальна система, здатна ефективно працювати зі складними багатфакторними процесами в умовах невизначеності.

Таким чином, використання штучних нейронних мереж у системах підтримки прийняття рішень є перспективним напрямом розвитку сучасних цифрових моделей управління. ANN дозволяють моделювати складні нелінійні залежності, забезпечують високу точність прогнозування, адаптивність та здатність до навчання. У контексті розроблення інтегральної моделі IDEM використання штучних нейронних мереж створює основу для формування інтелектуальної системи прогнозування та оцінювання ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами в умовах біосферосумісного розвитку.

Одним із ключових етапів побудови штучної нейронної мережі є формування якісної навчальної вибірки, яка забезпечує здатність моделі виявляти закономірності між вхідними та вихідними параметрами системи. У задачах прогнозування інтегральних показників ефективності особливого значення набуває репрезентативність даних, оскільки саме вона визначає точність, стійкість та узагальнюючу здатність нейронної мережі.

У межах даного дослідження формування датасету для ANN здійснювалося на основі поєднання методів Fuzzy Logic та Latin Hypercube Sampling, що дозволило створити масштабний сценарний простір для моделювання інтегрального індексу IDEM.

Особливістю запропонованого підходу є те, що штучна нейронна мережа не навчалася безпосередньо на емпіричних статистичних даних окремих підприємств, а використовувала синтетичний датасет, сформований за допомогою нечітко-логічної моделі. Такий підхід дозволяє інтегрувати експертні знання у процес формування навчальної вибірки та забезпечує можливість аналізу широкого спектра потенційних управлінських сценаріїв. У результаті Fuzzy Logic у даному дослідженні виконує не лише функцію системи прийняття рішень, але й роль генератора структурованих навчальних даних для подальшого використання у ANN.

Формування датасету базувалося на результатах попереднього етапу дослідження, представленого у розділі 4.2, де було реалізовано імітаційне моделювання на основі методу Latin Hypercube Sampling [254]. У межах дослідження було сформовано 3334 сценарії функціонування системи економіко-цифрового управління будівельними підприємствами. Кожен сценарій являє собою окрему комбінацію агрегованих показників верхнього рівня моделі, які використовуються як вхідні змінні для формування інтегрального індексу IDEM. Таким чином, датасет охоплює широкий спектр можливих станів підприємства – від низького рівня цифрової зрілості та економічної результативності до сценаріїв із високими показниками стійкості, екологічної ефективності та адаптивності управління.

Структура сформованого датасет є відносно компактною, проте водночас достатньо інформативною для задач нейромережевого моделювання. Вхідними параметрами нейронної мережі виступають п'ять агрегованих показників верхнього рівня Fuzzy-моделі:

- Out1 – економічна результативність підприємства;
- Out2 – цифрова зрілість управління;
- Out3 – екологічна та біосферосумісна ефективність;
- Out4 – стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість;
- Out5 – організаційно-інноваційна стійкість.

Кожен із цих показників формується на основі окремої підсистеми нижнього рівня, яка інтегрує відповідні групи вхідних параметрів. Таким чином, ANN фактично отримує узагальнену інформацію про ключові аспекти функціонування підприємства, що дозволяє зменшити розмірність задачі та сконцентруватися на моделюванні інтегральної залежності між агрегованими управлінськими характеристиками та фінальним індексом IDEM.

Після формування датасету було здійснено підготовку даних до навчання нейронної мережі. На цьому етапі проводилися перевірка цілісності вибірки, аналіз розподілу параметрів та формування фінальних масивів даних для ANN. Оскільки датасет генерувався автоматизовано за допомогою LHS та Fuzzy Logic, проблема пропущених значень або структурних помилок фактично була відсутня. Це є ще однією перевагою синтетичного датасету у порівнянні з реальними статистичними даними, які часто містять неповні записи, аномалії або невідповідності.

Для забезпечення коректного навчання ANN сформований датасет було поділено на три незалежні підмножини: навчальну вибірку; валідаційну вибірку; тестову вибірку. Навчальна вибірка використовувалася безпосередньо для коригування вагових коефіцієнтів нейронної мережі. Саме на цьому наборі даних ANN виявляла закономірності між вхідними параметрами Out1–Out5 та інтегральним індексом IDEM. Валідаційна вибірка застосовувалася для контролю процесу навчання та оцінювання здатності моделі до узагальнення. Аналіз помилок валідації дозволяє своєчасно виявляти проблему перенавчання, коли модель надто точно адаптується до навчального датасету, але втрачає здатність коректно прогнозувати нові дані. Тестова вибірка використовувалася на фінальному етапі оцінювання моделі та забезпечувала незалежну перевірку якості прогнозування ANN. Оскільки тестовий датасет не бере участі у процесі навчання, результати тестування дозволяють об'єктивно оцінити реальну прогнозну здатність нейронної мережі.

У більшості сучасних задач машинного навчання типовим є співвідношення 70–80 % даних для навчання та 20–30 % для валідації і тестування. У даному дослідженні поділ датасету також здійснювався з урахуванням необхідності забезпечення достатнього обсягу навчальних прикладів при одночасному збереженні репрезентативності.

Окремої уваги заслуговує сама логіка використання Fuzzy Logic як генератора навчальних даних для ANN. У класичних задачах машинного навчання нейронна мережа переважно навчається на реальних емпіричних даних, які можуть бути обмеженими, шумовими або недостатньо репрезентативними. У межах даного дослідження запропоновано інший підхід, у якому нечітко-логічна модель використовується як інтелектуальний генератор структурованого сценарного простору.

Фактично Fuzzy Logic формує базову експертну модель системи управління, у якій закладені знання щодо взаємодії економічних, цифрових, екологічних та організаційних факторів. Далі Latin Hypercube Sampling створює велику кількість можливих комбінацій параметрів, а ANN навчається відтворювати поведінку сформованої Fuzzy-моделі. Таким чином, нейронна мережа виступає апроксиматором складної системи нечіткого виведення.

Такий підхід має декілька суттєвих переваг. По-перше, він дозволяє значно підвищити швидкість прогнозування після завершення навчання ANN. Нечітко-логічні системи з великою кількістю правил можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів, особливо у випадку масштабного сценарного аналізу. Натомість навчена нейронна мережа здатна швидко генерувати результати навіть для великих масивів даних.

По-друге, використання синтетичного датасету дозволяє сформувати більш збалансований та репрезентативний простір сценаріїв. Реальні статистичні дані часто концентруються у певних діапазонах параметрів, тоді як рідкісні або критичні сценарії можуть бути недостатньо представленими. Метод LHS у поєднанні з Fuzzy Logic забезпечує більш рівномірне охоплення простору можливих станів системи.

По-третє, синтетичний датасет дозволяє уникнути проблем конфіденційності, неповноти або нестабільності, характерних для реальних корпоративних даних. Це особливо важливо у задачах економічного та управлінського моделювання, де доступ до повноцінної статистичної інформації підприємств часто є обмеженим.

Таким чином, формування навчальної вибірки на основі інтеграції Latin Hypercube Sampling та Fuzzy Logic створює ефективну основу для подальшого навчання штучної нейронної мережі. Сформований датасет із 3334 сценаріїв забезпечує достатню репрезентативність простору управлінських ситуацій, а використання нормалізованих агрегованих показників *Out1–Out5* дозволяє забезпечити стабільне та ефективне навчання ANN. У результаті формується гібридна інтелектуальна система, у якій Fuzzy Logic забезпечує експертну інтерпретованість моделі, а ANN – високу швидкість прогнозування та здатність до апроксимації складних нелінійних залежностей.

Для прогнозування інтегрального індексу ефективності економіко-цифрового управління IDEM у дослідженні використано штучну нейронну мережу типу багат шарового перцептрона. Вибір саме цього типу нейронної мережі є методологічно обґрунтованим, оскільки задача прогнозування IDEM належить до задач регресійного типу, у яких необхідно встановити функціональну залежність між набором вхідних агрегованих показників та одним вихідним інтегральним показником. На відміну від згорткових або рекурентних нейронних мереж, які переважно застосовуються для обробки зображень, послідовностей або часових рядів, MLP є доцільним інструментом для роботи з табличними структурованими даними.

У межах даного дослідження вхідний простір моделі формується п'ятьма агрегованими показниками верхнього рівня нечітко-логічної моделі:

$$X = [Out1, Out2, Out3, Out4, Out5] \quad (4.49)$$

де: *Out1* – характеризує економічну результативність підприємства, *Out2* – цифрову зрілість управління, *Out3* – екологічну та біосферосумісну

ефективність, *Out4* – стейкхолдерно-людиноцентричну орієнтованість, а *Out5* – організаційно-інноваційну стійкість.

Вихідною змінною нейронної мережі є інтегральний індекс:

$$Y = IDEM \quad (4.50)$$

Таким чином, ANN-модель апроксимує залежність:

$$IDEM = f(Out1, Out2, Out3, Out4, Out5) \quad (4.51)$$

Основна мета побудови такої нейронної мережі полягає не в заміні нечітко-логічної моделі, а в апроксимації її поведінки. Fuzzy Logic модель, сформована на попередніх етапах дослідження, виконує роль експертно-орієнтованої системи оцінювання. Вона містить базу правил, функції належності, процедури фазифікації, нечіткого виведення та дефазифікації. Натомість ANN-модель навчається відтворювати залежність між агрегованими показниками *Out1–Out5* та результатом *IDEM* на основі сформованого синтетичного датасету. У цьому сенсі штучна нейронна мережа виступає як обчислювально ефективний апроксиматор нечітко-логічної системи.

Архітектура моделі складається з одного вхідного шару, трьох прихованих повнозв'язних шарів та одного вихідного шару (рис. 4.15).

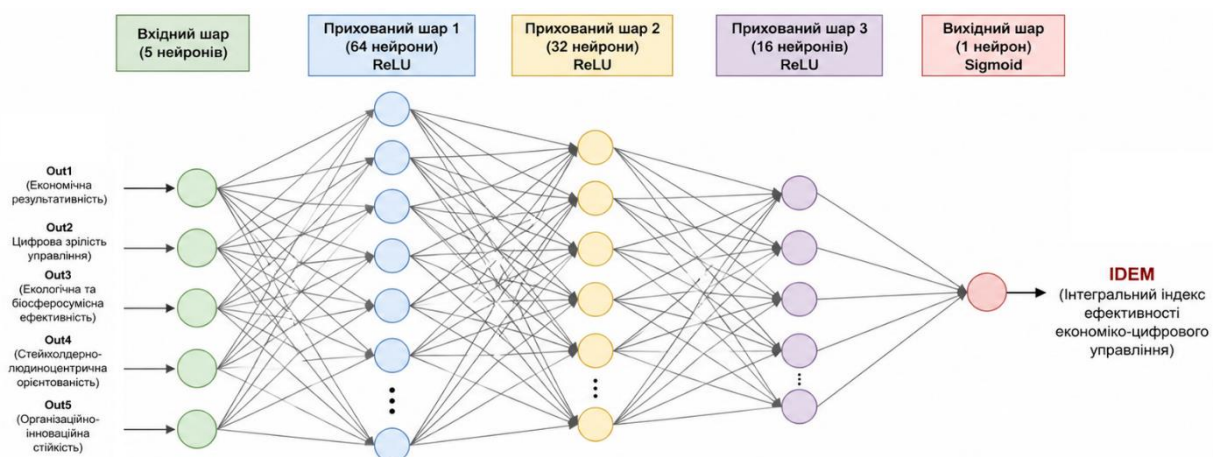


Рис. 4.15. Архітектура штучної нейронної мережі (ANN) для прогнозування IDEM

Джерело: розроблено автором.

Вхідний шар має розмірність 5, що відповідає кількості вхідних змінних верхнього рівня моделі IDEM. Перший прихований шар містить 64 нейрони, другий – 32 нейрони, третій – 16 нейронів. Вихідний шар містить один нейрон, який формує прогнозоване значення інтегрального індексу IDEM.

Загальну схему архітектури ANN можна подати так:

$$5 \rightarrow 64 \rightarrow 32 \rightarrow 16 \rightarrow 1$$

або у змістовній формі:

$$(Out1, Out2, Out3, Out4, Out5) \rightarrow H_1(64) \rightarrow H_2(32) \rightarrow H_3(16) \rightarrow IDEM$$

Використання трьох прихованих шарів дозволяє нейронній мережі послідовно формувати абстрактні представлення вхідних даних. Перший прихований шар із 64 нейронами забезпечує ширше початкове представлення комбінацій вхідних факторів. Другий шар із 32 нейронами виконує подальше ущільнення інформації та виділення більш узагальнених закономірностей. Третій шар із 16 нейронами формує компактне латентне представлення, яке передається до вихідного шару для розрахунку прогнозованого значення IDEM.

Така архітектура має спадну структуру кількості нейронів у прихованих шарах. Це означає, що мережа поступово переходить від ширшого представлення даних до більш стислого. Подібна логіка є доцільною для задач апроксимації інтегральних індексів, оскільки на вході модель отримує декілька узагальнених факторів, а на виході повинна сформувати одне інтегральне значення. У цьому випадку приховані шари виконують роль послідовного перетворення багатовимірного управлінського простору у скалярну оцінку ефективності.

Кожен нейрон прихованого шару виконує зважене підсумовування вхідних сигналів та застосовує функцію активації. Загально це можна записати так [232]:

$$z_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} x_i + b_j \quad (4.52)$$

де: z_j – зважена сума сигналів для j -го нейрона, x_i – вхідні значення, w_{ij} – вагові коефіцієнти між i -м входом та j -м нейроном, b_j – зміщення, n – кількість вхідних сигналів.

Після цього до значення z_j застосовується функція активації:

$$a_j = \varphi(z_j) \quad (4.53)$$

де: a_j – вихід нейрона, а φ – функція активації.

У прихованих шарах побудованої моделі використано функцію активації ReLU. Її формула має вигляд [234]:

$$ReLU(x) = \max(0, x) \quad (4.54)$$

Це означає, що всі додатні значення передаються далі без змін, а всі від’ємні значення перетворюються на нуль. ReLU є однією з найбільш поширених функцій активації у сучасних нейронних мережах, оскільки вона є простою з обчислювальної точки зору, сприяє швидшому навчанню моделі та частково зменшує проблему зникнення градієнтів. Для задачі прогнозування IDEM використання ReLU є доцільним, оскільки вона дозволяє моделі ефективно виявляти нелінійні залежності між показниками Out1–Out5.

Окрім ReLU, у практиці побудови ANN широко застосовуються й інші функції активації. Однією з класичних є sigmoid-функція [232]:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4.55)$$

Її вихідні значення завжди належать до інтервалу:

$$0 < \sigma(x) < 1$$

Саме тому sigmoid-функція використана у вихідному шарі даної моделі. Оскільки IDEM є нормалізованим інтегральним індексом у межах $[0; 1]$, застосування sigmoid на виході дозволяє гарантувати, що прогнозоване значення також залишатиметься у цьому діапазоні. Це є важливим з методологічної точки зору, оскільки вихід ANN має відповідати шкалі нечітко-логічної моделі.

Ще однією поширеною функцією активації є гіперболічний тангенс [54]:

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (4.56)$$

На відміну від sigmoid, функція $\tanh$ формує значення у діапазоні:

$$-1 < \tanh(x) < 1 \quad (4.56)$$

Ця функція часто використовується тоді, коли дані центровані навколо нуля або коли модель потребує симетричного діапазону вихідних значень. У даній задачі використання $\tanh$ на виході не є оптимальним, оскільки IDEM не має від'ємних значень. Проте $\tanh$ теоретично може застосовуватися у прихованих шарах як альтернатива ReLU.

Також у сучасних архітектурах ANN часто використовуються модифікації ReLU, зокрема Leaky ReLU та ELU. Leaky ReLU має вигляд [55]:

$$\text{LeakyReLU}(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ \alpha x, & x \leq 0 \end{cases} \quad (4.58)$$

де α – малий додатний коефіцієнт, наприклад 0,01.

На відміну від звичайної ReLU, ця функція не обнуляє повністю від'ємні значення, а пропускає їх із малим коефіцієнтом. Це дозволяє частково уникати проблеми “мертвих нейронів”, коли окремі нейрони перестають оновлюватися під час навчання.

Для вихідного шару у задачах регресії часто застосовується лінійна функція активації [232]:

$$f(x) = x \quad (4.59)$$

Проте у даному дослідженні вихідний шар має sigmoid-активацію, оскільки цільова змінна IDEM є нормалізованою в межах $[0; 1]$. Такий вибір є логічним, оскільки модель не повинна прогнозувати значення, менші за 0 або більші за 1.

Під час навчання нейронної мережі важливу роль відіграє функція втрат. Функція втрат визначає, наскільки прогнозовані значення ANN відрізняються від цільових значень IDEM, отриманих за допомогою Fuzzy Logic. Для задач

регресійного типу найбільш поширеною є середньоквадратична помилка – Mean Squared Error [236]:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.60)$$

де: y_i – фактичне значення IDEM, отримане з нечітко-логічної моделі, $\hat{y}_i$ – прогнозоване значення IDEM, сформоване ANN, n – кількість спостережень.

MSE сильніше штрафувє великі помилки, оскільки різниця між фактичним і прогнозованим значенням підноситься до квадрата.

Ще однією поширеною функцією втрат є Mean Absolute Error [237]:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (4.61)$$

MAE є простішою для інтерпретації, оскільки показує середню абсолютну величину помилки прогнозування. На відміну від MSE, вона менш чутлива до поодиноких великих відхилень. У задачах оцінювання якості прогнозування IDEM доцільно використовувати обидва показники: MSE як основну функцію втрат під час навчання та MAE як додаткову метрику інтерпретації точності моделі.

Також може застосовуватися Root Mean Squared Error [237]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.62)$$

Перевага RMSE полягає в тому, що цей показник має ту саму розмірність, що й вихідна змінна. Оскільки IDEM нормалізований у межах $[0;1]$, RMSE можна безпосередньо інтерпретувати як середню величину прогнозного відхилення у шкалі інтегрального індексу.

Для оцінювання відносної похибки іноді використовується Mean Absolute Percentage Error [237]:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (4.63)$$

Однак у випадку нормалізованих індексів MAPE слід застосовувати обережно, оскільки при дуже малих значеннях y_i відносна похибка може штучно зростати.

Коефіцієнт детермінації R^2 є однією з основних метрик оцінювання якості регресійних моделей та широко використовується для аналізу точності прогнозування штучних нейронних мереж. У контексті даного дослідження показник R^2 використовується для оцінювання здатності ANN-моделі відтворювати залежність між агрегованими показниками *Out1* – *Out5* та інтегральним індексом IDEM.

Формула коефіцієнта детермінації має вигляд [237]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.64)$$

де: $\bar{y}$ – середнє значення фактичних даних; n – кількість спостережень.

Чисельник формули характеризує суму квадратів помилок прогнозування моделі (Residual Sum of Squares, RSS), тобто різницю між фактичними та прогнозованими значеннями.

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.65)$$

Знаменник:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.66)$$

є загальною сумою квадратів відхилень (Total Sum of Squares, TSS), яка характеризує загальну варіативність даних.

Таким чином, коефіцієнт R^2 показує, яку частку варіації вихідної змінної пояснює модель ANN. Значення R^2 належить до діапазону:

$$0 \leq R^2 \leq 1$$

Значення:

$R^2 \approx 1$ свідчить про дуже високу точність моделі;

$R^2 \approx 0$ означає, що модель практично не пояснює варіативність даних;

чим ближче R^2 до 1, тим краще ANN апроксимує залежність між вхідними параметрами та IDEM.

У задачах прогнозування інтегральних індексів значення:

$R^2 > 0.90$ зазвичай вважається дуже добрим результатом;

$R^2 > 0.95$ – високоточним прогнозуванням;

$R^2 > 0.98$ – майже повним відтворенням поведінки моделі.

У даному дослідженні коефіцієнт детермінації має особливо важливе значення, оскільки ANN використовується як апроксиматор нечітко-логічної системи IDEM. Високе значення R^2 свідчить про те, що штучна нейронна мережа успішно відтворює складні нелінійні залежності, сформовані в межах Fuzzy Logic-моделі.

Ще одним важливим елементом архітектури та процесу навчання ANN є оптимізатор. Оптимізатор визначає спосіб оновлення вагових коефіцієнтів нейронної мережі з метою мінімізації функції втрат. Загальна ідея градієнтного оновлення ваг може бути записана так:

$$w_{t+1} = w_t - \eta \frac{\partial L}{\partial w_t} \quad (4.67)$$

де: w_t – значення вагового коефіцієнта на поточній ітерації, w_{t+1} – оновлене значення ваги, η – швидкість навчання, L – функція втрат, $\frac{\partial L}{\partial w_t}$ – градієнт функції втрат за відповідною вагою.

Найпростішим оптимізатором є Stochastic Gradient Descent. Його суть полягає у послідовному оновленні ваг у напрямку зменшення функції втрат. Базова формула SGD відповідає класичному градієнтному спуску:

$$w_{t+1} = w_t - \eta \nabla L(w_t) \quad (4.68)$$

де: $\nabla L(w_t)$ – градієнт функції втрат.

Перевагою SGD є простота, однак його недоліком може бути повільна збіжність та чутливість до вибору швидкості навчання.

Для прискорення навчання часто використовується SGD with Momentum. У цьому випадку враховується не лише поточний градієнт, але й попередній напрям руху:

$$v_t = \gamma v_{t-1} + \eta \nabla L(w_t) \quad (4.69)$$

$$w_{t+1} = w_t - v_t \quad (4.70)$$

де: v_t – швидкість оновлення, γ – коефіцієнт momentum.

Такий підхід дозволяє згладити коливання та прискорити рух у напрямку мінімуму функції втрат.

Одним із найбільш популярних сучасних оптимізаторів є Adam, тобто Adaptive Moment Estimation. Він поєднує ідеї momentum та адаптивного налаштування швидкості навчання для різних параметрів моделі. Спрощено логіку Adam можна описати через оцінку першого та другого моментів градієнта:

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) g_t \quad (4.71)$$

$$v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) g_t^2 \quad (4.72)$$

де: m_t – експоненційне середнє градієнтів, v_t – експоненційне середнє квадратів градієнтів, g_t – поточний градієнт, β_1 та β_2 – параметри згладжування.

Оновлення ваг у Adam здійснюється з урахуванням цих моментів, що забезпечує стабільне та швидке навчання у багатьох практичних задачах.

Серед інших популярних оптимізаторів можна також виділити RMSprop, Adagrad та Nadam. RMSprop адаптує швидкість навчання для кожного параметра з урахуванням середнього квадрата попередніх градієнтів. Adagrad накопичує інформацію про попередні градієнти та зменшує швидкість навчання для часто оновлюваних параметрів. Nadam поєднує Adam із Nesterov momentum. У задачах прогнозування на табличних даних найчастіше

ефективними є Adam та RMSprop, однак остаточний вибір оптимізатора має здійснюватися експериментально на основі якості навчання та валідації.

У межах даного дослідження найбільш доцільним оптимізатором є Adam, оскільки він добре працює з невеликими та середніми датасетом, забезпечує швидку збіжність і не потребує надмірно складного ручного налаштування швидкості навчання. Для сформованого датасет із 3334 сценаріїв Adam є практично зручним рішенням, оскільки дозволяє ефективно навчити MLP-модель на нормалізованих даних.

Крім архітектури шарів, функцій активації, функції втрат і оптимізатора, важливе значення мають гіперпараметри навчання. До них належать кількість епох, розмір пакета даних, швидкість навчання та умови зупинки навчання. Кількість епох визначає, скільки разів модель проходить через повну навчальну вибірку. Якщо кількість епох є надто малою, модель може не встигнути навчитися основним закономірностям.

Розмір пакета даних визначає кількість прикладів, які використовуються для одного кроку оновлення ваг. Малий пакет даних може забезпечити кращу стохастичність навчання, але збільшити час обчислень. Великий пакет даних може пришвидшити обчислення, але іноді погіршує здатність моделі до узагальнення. Для датасету розміром 3334 сценарії доцільно використовувати пакет даних у межах 16–64. Практично обґрунтованим варіантом може бути пакет даних = 32, оскільки це поширене компромісне значення між стабільністю навчання та швидкістю обчислень.

Узагальнені гіперпараметри моделі наведені в таблиці 4.1.

Логіка вибору саме такої архітектури базується на декількох міркуваннях. По-перше, вхідний простір моделі має невелику розмірність, оскільки ANN отримує лише п'ять агрегованих показників верхнього рівня. Тому немає потреби у надмірно глибокій або дуже широкій мережі. По-друге, залежність між Out1–Out5 та IDEM є нелінійною, оскільки вона формується на основі нечітко-логічної системи Mamdani з базою правил і дефазифікацією. Саме тому проста лінійна регресійна модель може бути недостатньою для

якісного відтворення поведінки Fuzzy-моделі. По-третє, три приховані шари дозволяють забезпечити достатню гнучкість ANN без надмірного ускладнення архітектури.

Спадна структура 64–32–16 також має практичну логіку. Перший прихований шар виконує розширене кодування взаємодії п'яти вхідних факторів. Другий шар узагальнює ці взаємодії, а третій шар формує компактне представлення, яке безпосередньо пов'язується з вихідним значенням IDEM. Така архітектура дозволяє уникнути надмірної складності, але водночас зберегти здатність моделі до апроксимації нелінійної функції.

Таблиця 4.1

Гіперпараметри моделі прогнозування інтегрального індексу IDEM

Елемент моделі	Прийняте рішення
Тип мережі	Multilayer Perceptron
Кількість входів	5
Вхідні змінні	Out1, Out2, Out3, Out4, Out5
Вихідна змінна	IDEM
Прихований шар 1	64 нейрони
Прихований шар 2	32 нейрони
Прихований шар 3	16 нейронів
Вихідний шар	1 нейрон
Рекомендована функція втрат	MSE
Додаткові метрики	MAE, RMSE, R^2
Рекомендований оптимізатор	Adam
Рекомендований розмір пакета даних	32
Кількість епох	визначається експериментально (100–300)
Тип задачі	регресійне прогнозування нормалізованого індексу

Джерело: сформовано автором

Вихідний шар із одним нейроном повністю відповідає сутності задачі, оскільки модель повинна прогнозувати одне числове значення інтегрального індексу. Використання sigmoid-функції на виході є важливим, оскільки воно забезпечує відповідність прогнозованих значень шкалі IDEM. Якби на виході використовувалася лінійна активація, модель теоретично могла б формувати значення поза межами $[0;1]$, що потребувало б додаткового обмеження або постобробки результатів.

З позиції систем підтримки прийняття рішень запропонована ANN-архітектура виконує роль швидкого прогнозного модуля. Після навчання модель може оперативно оцінювати IDEM для нових комбінацій Out1–Out5 без повторного виконання повної процедури нечіткого виведення. Це створює передумови для використання ANN у цифрових управлінських системах, де необхідне швидке сценарне прогнозування, порівняння альтернатив або оцінювання наслідків управлінських рішень.

Висновки до розділу 4

1. У результаті дослідження сформовано багаторівневу нечітко-логічну модель IDEM, яка забезпечує комплексне оцінювання ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами з урахуванням економічних, цифрових, екологічних, соціальних та організаційних компонентів.

2. Запропонована дворівнева архітектура моделі дозволила структуровано інтегрувати локальні функціональні підсистеми Out1–Out5 у межах єдиного інтегрального індексу IDEM, що підвищує інтерпретованість та гнучкість системи оцінювання.

3. Використання апарату нечіткої логіки Mamdani підтвердило доцільність застосування інтелектуальних методів моделювання для задач оцінювання складних управлінських систем в умовах невизначеності, неповноти інформації та наявності якісних параметрів.

4. Обґрунтовано доцільність використання методу Latin Hypercube Sampling для сценарного моделювання багаторівневої нечітко-логічної моделі IDEM в умовах багатофакторної невизначеності, що дозволило забезпечити рівномірне покриття простору параметрів та підвищити репрезентативність результатів моделювання.

5. Сформовано сценарний простір моделі IDEM на основі агрегованих показників Out1–Out5, що дозволило інтегрувати економічні, цифрові, екологічні, стейкхолдерні та організаційно-інноваційні компоненти системи управління в межах єдиної системи підтримки прийняття рішень, заснованої на моделюванні.

6. У результаті застосування Latin Hypercube Sampling було сформовано датасет із 3334 сценаріїв, який охоплює практично весь нормалізований діапазон зміни параметрів та забезпечує можливість аналізу поведінки інтегрального індексу IDEM у широкому спектрі умов функціонування підприємства.

7. Розроблено архітектуру штучної нейронної мережі типу Multilayer Perceptron (MLP) для прогнозування інтегрального індексу IDEM на основі агрегованих показників Out1–Out5, що дозволило реалізувати нелінійне відображення між вхідними факторами та інтегральною оцінкою ефективності економіко-цифрового управління.

8. Підтверджено доцільність використання гібридного підходу Fuzzy Logic та ANN, у якому нечітко-логічна модель виступає генератором структурованих навчальних даних для нейронної мережі, що забезпечує формування стабільного та репрезентативного датасету.

9. Встановлено, що застосування багатопшарової архітектури з прихованими шарами дозволяє ефективно апроксимувати складні нелінійні взаємозв'язки між економічними, цифровими, екологічними та організаційними компонентами моделі IDEM.

РОЗДІЛ 5

НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВАМИ-СТЕЙКХОЛДЕРАМИ ПРОЄКТІВ БІОСФЕРОСУМІСНОГО БУДІВНИЦТВА

5.1. Прикладна апробація багаторівневої нечітко-логічної моделі та інтегрального індексу IDEM для підприємств-стейкхолдерів

Після формування архітектури багаторівневої нечітко-логічної моделі та обґрунтування структури інтегрального індексу IDEM наступним етапом дослідження є практична апробація запропонованого підходу. Сам факт побудови нечітко-логічної системи ще не підтверджує її прикладної ефективності, оскільки будь-яка модель потребує перевірки здатності адекватно відображати реальні управлінські процеси та реагувати на зміну вхідних параметрів. Саме тому важливим завданням є демонстрація можливості використання моделі для оцінювання ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами в умовах біосферосумісного розвитку.

Практичне застосування моделі IDEM передбачає вирішення декількох взаємопов'язаних завдань. Насамперед необхідною є адаптація структури моделі до специфіки функціонування будівельних підприємств, особливостей цифрової трансформації галузі, доступності вихідної інформації та характеру управлінських процесів. Водночас важливо забезпечити можливість використання як кількісних, так і якісних показників, значна частина яких не може бути описана за допомогою класичних детермінованих методів.

Окремого значення набуває питання стійкості результатів моделювання та їхньої чутливості до зміни окремих вхідних параметрів. У межах запропонованої моделі інтегральний показник IDEM формується під впливом п'яти функціональних компонентів, кожен із яких, своєю чергою, залежить від системи локальних показників нижнього рівня. У зв'язку з цим виникає

необхідність оцінювання того, яким чином зміна економічних, цифрових, екологічних, організаційних або соціальних параметрів впливає на фінальний результат моделювання.

Практичне використання моделі також передбачає необхідність забезпечення інтерпретованості отриманих результатів. Інтегральний індекс IDEM не повинен розглядатися виключно як абстрактний числовий показник. Його значення має формувати інформаційну основу для прийняття управлінських рішень та дозволяти здійснювати комплексний аналіз стану підприємства в умовах цифрової економіки та біосферосумісного розвитку.

Особливістю запропонованого нечітко-логічного підходу є відсутність жорсткого поділу підприємств на категорії «ефективних» або «неефективних». На відміну від традиційних моделей, що використовують фіксовані порогові значення, система IDEM дозволяє визначати ступінь наближення підприємства до певного рівня ефективності економіко-цифрового управління. Це створює можливість виявлення проміжних або перехідних станів системи, які мають важливе значення для стратегічного аналізу та оцінювання перспектив розвитку підприємства.

Запропонований підхід є особливо актуальним для будівельної галузі, де підприємства функціонують в умовах високої невизначеності, нестабільності ринку, змін нормативного середовища та постійної технологічної трансформації. У таких умовах використання жорстких математичних меж часто не дозволяє адекватно відобразити реальний стан системи управління. Натомість нечітка логіка забезпечує більш гнучке моделювання складних управлінських процесів та дозволяє враховувати часткову належність підприємства до різних рівнів ефективності.

Практична апробація моделі IDEM також створює можливість проведення порівняльного аналізу будівельних підприємств за рівнем ефективності їхнього економіко-цифрового управління. Це має важливе значення для формування інвестиційних портфелів, оцінювання потенціалу підприємств до реалізації масштабних інфраструктурних проєктів, відбору

підрядних організацій та аналізу готовності підприємств до впровадження цифрових і ESG-орієнтованих стратегій розвитку.

Крім того, результати нечітко-логічного оцінювання можуть виступати інформаційною основою для подальших етапів аналітичного моделювання. Зокрема, інтегральний індекс IDEM може використовуватися у процедурах сценарного аналізу, Monte Carlo-моделювання, багатокритеріального ранжування альтернатив, оцінювання чутливості системи та побудови прогнозних моделей на основі методів штучного інтелекту. Таким чином, нечітко-логічна модель виступає не лише інструментом оцінювання, але й складовою більш широкої системи підтримки прийняття управлінських рішень. Важливим аспектом практичного використання моделі є її прозорість та пояснюваність для управлінського персоналу підприємства. Однією з переваг нечітко-логічного підходу є можливість аналізу активованих правил та оцінювання впливу окремих вхідних параметрів на фінальний результат моделювання. Це дозволяє не лише отримати числове значення інтегрального індексу, але й зрозуміти причини формування відповідного рівня ефективності системи управління.

У контексті сучасної цифрової трансформації будівельної галузі така інтерпретованість моделі має особливе значення, оскільки сприяє підвищенню довіри до результатів моделювання та створює можливість їх безпосереднього використання у процесах стратегічного та операційного управління.

Практична апробація моделі IDEM також дозволяє оцінити її адаптивність до різних сценаріїв функціонування підприємств. Зміна рівня цифрової зрілості, економічної результативності, екологічної ефективності або організаційної стійкості повинна супроводжуватися відповідною зміною значення інтегрального індексу. Саме така чутливість моделі до зміни параметрів підтверджує її адекватність та можливість використання в умовах реального управлінського середовища.

Практичне використання багаторівневої нечітко-логічної моделі IDEM є необхідним етапом дослідження, спрямованим на підтвердження її прикладної

цінності, адаптивності та можливості інтеграції в систему підтримки управлінських рішень будівельних підприємств. Отримані результати створюють основу для подальшого розвитку інструментарію економіко-цифрового управління, реалізації сценарного аналізу та формування стратегічних рекомендацій щодо забезпечення ефективного та біосферосумісного розвитку будівельних підприємств в умовах цифрової економіки. Для перевірки працездатності запропонованої нечітко-логічної підсистеми Out1 було виконано моделювання економічної результативності для 5 будівельних підприємств, які характеризуються різним рівнем фінансово-економічного розвитку. Основною метою апробації є демонстрація здатності моделі адекватно реагувати на зміну вхідних економічних параметрів та формувати інтегральний показник економічної результативності підприємства.

Отримані результати (таблиця 5.1, нис. 5.1) свідчать про високу чутливість моделі до зміни вхідних параметрів та логічну узгодженість сформованих інтегральних оцінок.

Таблиця 5.1

Результати використання підсистеми Out1 «Економічна результативність підприємства»

Показник	Назва	Об'єкт А	Об'єкт В	Об'єкт С	Об'єкт D	Об'єкт Е
In1	Рентабельність операційної діяльності	0,78	0,62	0,41	0,29	0,86
In2	Фінансова стійкість підприємства	0,74	0,58	0,46	0,31	0,82
In3	Ресурсно-економічна ефективність	0,69	0,64	0,38	0,35	0,79
In4	Інвестиційно-економічна привабливість	0,72	0,55	0,43	0,27	0,88
Out1	Економічна результативність	0,74	0,6	0,41	0,3	0,84

Джерело: розроблено автором

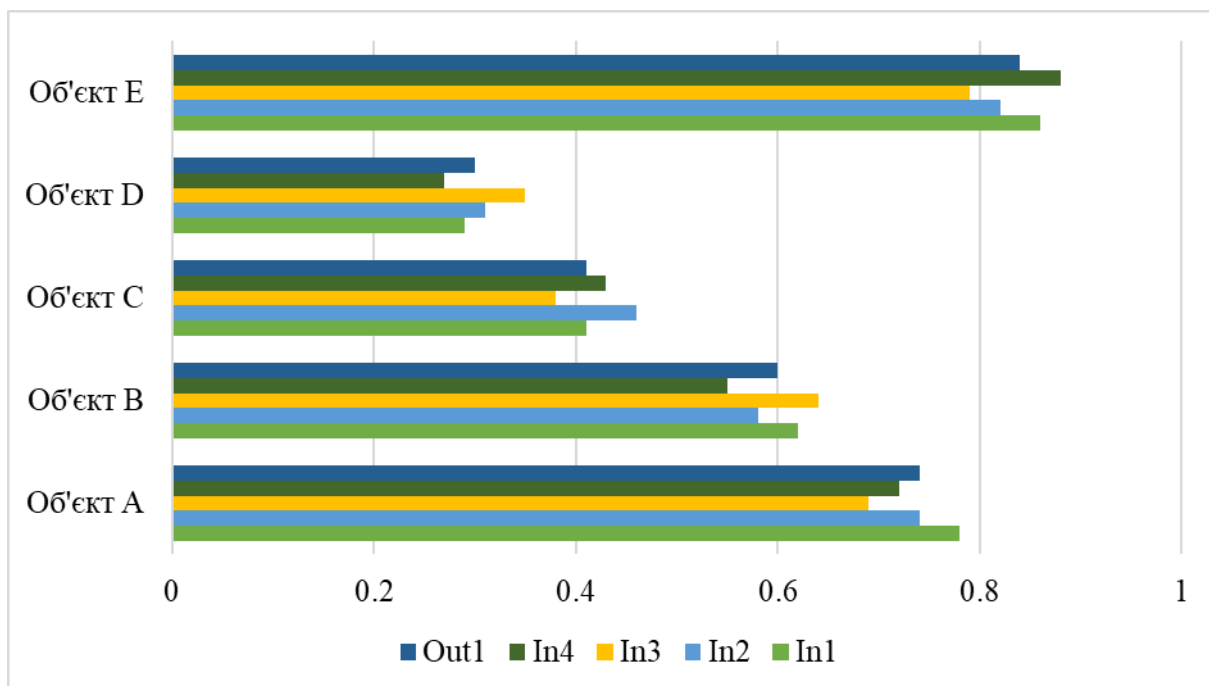


Рис. 5.1. Результати використання підсистеми Out1 «Економічна результативність підприємства»

Джерело: розроблено автором.

Найвище значення показника Out1 було отримано для Об'єкта E і становило 0,84. Даний результат пояснюється високими значеннями всіх вхідних параметрів, зокрема рентабельності операційної діяльності (0,86), фінансової стійкості (0,82), ресурсно-економічної ефективності (0,79) та інвестиційно-економічної привабливості (0,88). Така комбінація параметрів відповідає підприємству зі стабільним фінансовим станом, високим рівнем ефективності використання ресурсів та значним потенціалом розвитку.

Високе значення інтегрального показника також продемонстрував Об'єкт A, для якого значення Out1 становило 0,74. При цьому підприємство характеризується достатньо високими значеннями рентабельності діяльності (0,78), фінансової стійкості (0,74), ресурсно-економічної ефективності (0,69) та інвестиційної привабливості (0,72). Отриманий результат свідчить про стабільний економічний стан підприємства та ефективне функціонування його економічної системи управління.

Для Об'єкта В інтегральний показник економічної результативності становив 0,60, що відповідає середньому рівню економічної ефективності. Значення вхідних параметрів для даного підприємства знаходяться у межах середнього діапазону: рентабельність операційної діяльності – 0,62, фінансова стійкість – 0,58, ресурсно-економічна ефективність – 0,64, інвестиційно-економічна привабливість – 0,55. Отриманий результат характеризує підприємство як економічно стабільне, однак таке, що потребує подальшого підвищення ефективності окремих напрямів діяльності.

Об'єкт С отримав значення інтегрального показника Out1 на рівні 0,41. При цьому значення вхідних параметрів є помірно низькими: рентабельність діяльності становить 0,41, фінансова стійкість – 0,46, ресурсно-економічна ефективність – 0,38, а інвестиційна привабливість – 0,43. Такий результат свідчить про наявність окремих економічних проблем та недостатню стабільність системи управління підприємством. Водночас модель не класифікує даний об'єкт як критично неефективний, що підтверджує здатність нечіткої логіки враховувати проміжні стани системи.

Найнижче значення інтегрального показника було отримано для Об'єкта D – 0,30. Це пояснюється низькими значеннями всіх економічних параметрів: рентабельність операційної діяльності становить 0,29, фінансова стійкість – 0,31, ресурсно-економічна ефективність – 0,35, а інвестиційно-економічна привабливість – 0,27. Отриманий результат свідчить про низький рівень економічної результативності підприємства та наявність значних ризиків для його стабільного функціонування в умовах конкурентного ринку.

Порівняльний аналіз результатів моделювання дозволяє зробити висновок, що запропонована нечітко-логічна система адекватно реагує на зміну вхідних параметрів та забезпечує логічно узгоджене формування інтегрального показника економічної результативності. Зі збільшенням значень ключових економічних характеристик спостерігається відповідне зростання інтегрального показника Out1, що підтверджує коректність сформованої бази нечітких правил та загальної структури моделі.

Важливою перевагою запропонованого підходу є можливість виявлення не лише крайніх станів системи, але й проміжних рівнів економічної ефективності. На відміну від класичних методів оцінювання, де підприємство часто відноситься до жорстко визначеної категорії, нечітко-логічна модель дозволяє враховувати часткову належність до різних рівнів економічної результативності. Це забезпечує більш гнучке та реалістичне моделювання управлінських процесів.

Для перевірки ефективності роботи підсистеми Out2 було проведено моделювання рівня цифрової зрілості управління п'яти будівельних підприємств, які характеризуються різним ступенем цифрової трансформації, автоматизації процесів та розвитку цифрової інфраструктури. Основною метою апробації є оцінювання здатності нечітко-логічної моделі адекватно відображати вплив цифрових параметрів на загальний рівень цифрової зрілості системи управління підприємством. Отримані результати наведено в таблиці 5.2 та рис. 5.2.

Таблиця 5.2

Результати використання підсистеми Out2 «Цифрова зрілість управління»

Показник	Назва	Об'єкт А	Об'єкт В	Об'єкт С	Об'єкт D	Об'єкт Е
In5	Рівень цифрової інтеграції процесів	0,81	0,66	0,47	0,34	0,89
In6	Рівень автоматизації управлінських процесів	0,76	0,61	0,44	0,28	0,91
In7	Зрілість систем управління даними	0,73	0,58	0,39	0,31	0,87
In8	Цифрова компетентність персоналу	0,79	0,63	0,52	0,37	0,93
Out2	Цифрова зрілість управління	0,77	0,62	0,46	0,33	0,9

Джерело: розроблено автором.

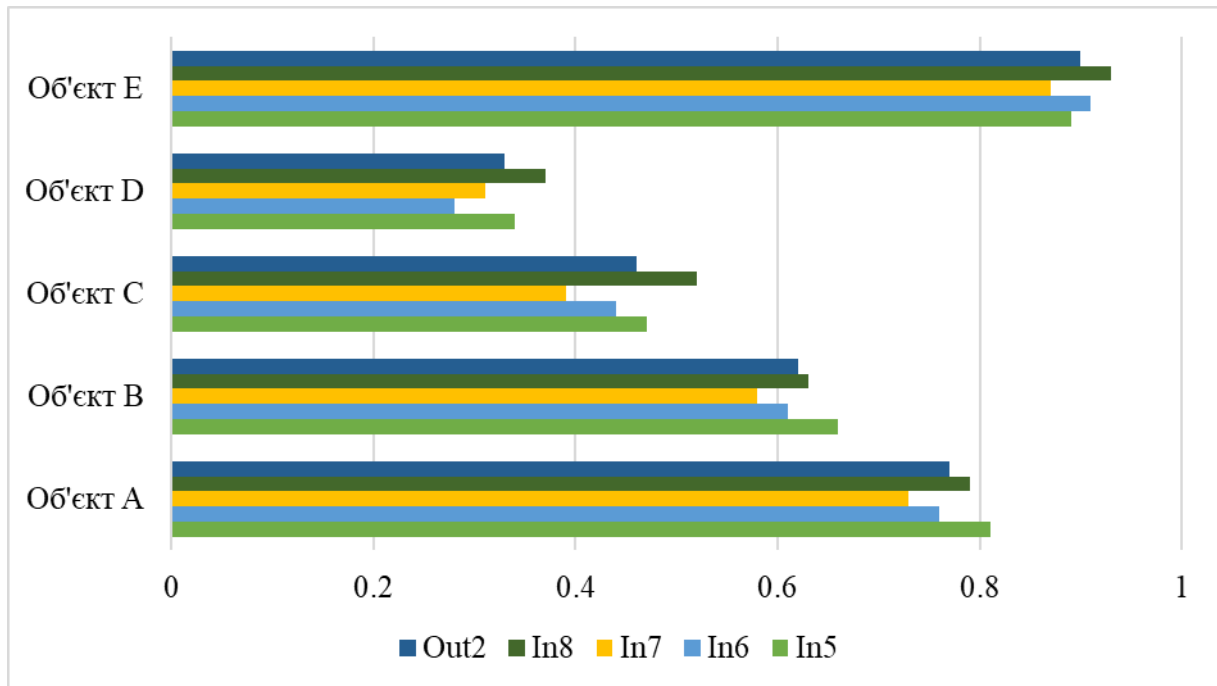


Рис. 5.2. Результати використання підсистеми Out2 «Цифрова зрілість управління»

Джерело: розроблено автором.

Найвище значення інтегрального показника Out2 було отримано для Об'єкта E і становило 0,90. Такий результат пояснюється високими значеннями всіх вхідних параметрів: рівень цифрової інтеграції процесів становить 0,89, рівень автоматизації управлінських процесів – 0,91, зрілість систем управління даними – 0,87, а цифрова компетентність персоналу – 0,93. Отриманий результат характеризує підприємство як високорозвинену цифрову організацію, в якій цифрові технології інтегровані у ключові виробничі та управлінські процеси.

Високий рівень цифрової зрілості також продемонстрував Об'єкт A, для якого значення інтегрального показника становило 0,77. Підприємство характеризується достатньо високими значеннями рівня цифрової інтеграції (0,81), автоматизації управління (0,76), зрілості систем управління даними (0,73) та цифрової компетентності персоналу (0,79). Отриманий результат свідчить про високий рівень цифрової трансформації підприємства та ефективне використання сучасних цифрових технологій у системі управління.

Для Об'єкта В значення інтегрального показника цифрової зрілості становило 0,62, що відповідає середньому рівню розвитку цифрового управління. Значення окремих вхідних параметрів також перебувають у середньому діапазоні: рівень цифрової інтеграції процесів становить 0,66, автоматизація управлінських процесів – 0,61, зрілість систем управління даними – 0,58, а цифрова компетентність персоналу – 0,63. Такий результат свідчить про наявність базових елементів цифрової трансформації, однак окремі компоненти системи ще потребують подальшого розвитку.

Об'єкт С отримав значення інтегрального показника Out2 на рівні 0,46. При цьому значення вхідних параметрів є помірно низькими: рівень цифрової інтеграції процесів становить 0,47, автоматизація управління – 0,44, зрілість систем управління даними – 0,39, а цифрова компетентність персоналу – 0,52. Отриманий результат свідчить про часткову цифрову трансформацію підприємства та наявність окремих елементів цифрового управління, однак загальний рівень цифрової зрілості ще залишається недостатнім.

Найнижче значення інтегрального показника було отримано для Об'єкта D – 0,33. Даний результат пояснюється низькими значеннями всіх вхідних параметрів: рівень цифрової інтеграції процесів становить 0,34, автоматизація управлінських процесів – 0,28, зрілість систем управління даними – 0,31, а цифрова компетентність персоналу – 0,37. Це свідчить про недостатній рівень цифрової трансформації підприємства, низьку інтеграцію цифрових технологій та обмежені можливості ефективного функціонування в умовах цифрової економіки.

Порівняльний аналіз результатів моделювання підтверджує, що запропонована нечітко-логічна модель коректно реагує на зміну вхідних цифрових параметрів та забезпечує логічно узгоджене формування інтегрального показника цифрової зрілості управління. Зі збільшенням рівня автоматизації, цифрової інтеграції, розвитку цифрових компетентностей персоналу спостерігається відповідне зростання інтегрального показника Out2.

Особливістю запропонованого підходу є можливість комплексного врахування різнорідних цифрових характеристик підприємства в межах єдиної моделі. На відміну від традиційних підходів, де цифрова трансформація часто оцінюється за окремими локальними показниками, нечітко-логічна система дозволяє інтегрувати технічні, організаційні та кадрові аспекти цифрового розвитку підприємства.

Важливою перевагою моделі є також здатність відображати проміжні стани цифрової зрілості. Це має особливе значення для будівельної галузі, де цифрова трансформація часто здійснюється поступово та характеризується нерівномірним розвитком окремих компонентів системи управління.

Для перевірки працездатності підсистеми Out3 було проведено моделювання рівня екологічної та біосферосумісної ефективності для п'яти будівельних підприємств, які характеризуються різними параметрами екологічної відповідальності, енергоефективності та ресурсного управління. Основною метою апробації є оцінювання здатності нечітко-логічної моделі адекватно відображати вплив екологічних параметрів на інтегральний рівень біосферосумісної ефективності підприємства. Отримані результати представлені у таблиці 5.3 та на рис. 5.3.

Найвище значення інтегрального показника Out3 було отримано для Об'єкта Е і становило 0,90. Такий результат пояснюється високими значеннями рівня енергоефективності виробництва (0,88), ефективності використання ресурсів і матеріалів (0,91) та ESG-екологічної відповідності (0,93). Водночас для даного об'єкта зафіксовано найнижче значення інтенсивності екологічного впливу – 0,19, що свідчить про мінімальний рівень негативного впливу на навколишнє середовище. Отриманий результат характеризує підприємство як найбільш екологічно орієнтоване та біосферосумісне серед усіх досліджуваних об'єктів.

Таблиця 5.3

Результати використання підсистеми Out3 «Екологічна та біосферосумісна ефективність»

Показник	Назва	Об'єкт А	Об'єкт В	Об'єкт С	Об'єкт D	Об'єкт Е
In9	Рівень енергоефективності виробництва	0,74	0,63	0,45	0,29	0,88
In10	Інтенсивність екологічного впливу	0,28	0,41	0,57	0,76	0,19
In11	Ефективність використання ресурсів і матеріалів	0,71	0,59	0,48	0,34	0,91
In12	ESG-екологічна відповідність	0,77	0,62	0,44	0,26	0,93
Out3	Екологічна та біосферосумісна ефективність	0,73	0,58	0,45	0,27	0,9

Джерело: розроблено автором.

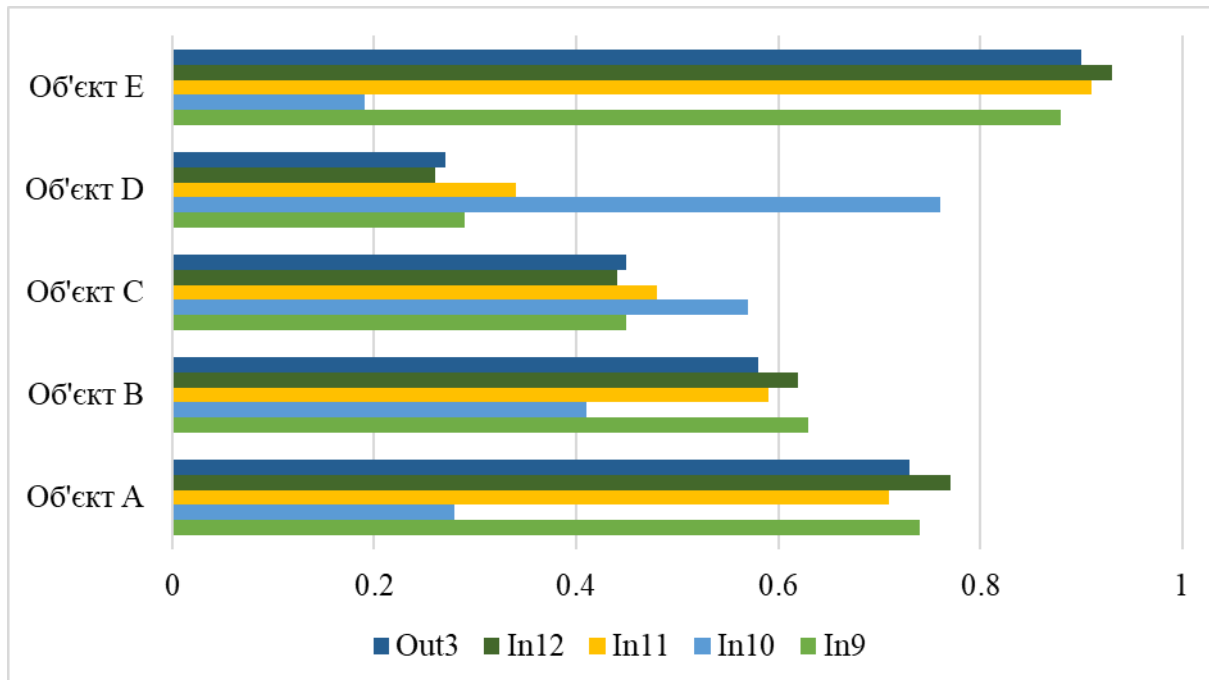


Рис. 5.3. Результати використання підсистеми Out3 «Екологічна та біосферосумісна ефективність»

Джерело: розроблено автором.

Високий рівень екологічної ефективності також продемонстрував Об'єкт А, для якого значення інтегрального показника становило 0,73. Підприємство характеризується достатньо високим рівнем енергоефективності (0,74), ефективністю використання ресурсів (0,71) та ESG-відповідністю (0,77). При цьому інтенсивність екологічного впливу для даного об'єкта становить 0,28, що відповідає відносно низькому рівню екологічного навантаження. Отриманий результат свідчить про ефективне поєднання економічної діяльності підприємства з принципами екологічної відповідальності та сталого розвитку.

Для Об'єкта В значення інтегрального показника Out3 становило 0,58, що відповідає середньому рівню екологічної ефективності. Значення окремих параметрів також перебувають у середньому діапазоні: рівень енергоефективності виробництва становить 0,63, інтенсивність екологічного впливу – 0,41, ефективність використання ресурсів – 0,59, а ESG-екологічна відповідність – 0,62. Отриманий результат свідчить про достатньо стабільний екологічний стан підприємства, однак окремі аспекти екологічного менеджменту ще потребують подальшого вдосконалення.

Об'єкт С отримав значення інтегрального показника Out3 на рівні 0,45. Для даного підприємства характерними є помірно низькі значення енергоефективності виробництва (0,45), ефективності використання ресурсів (0,48) та ESG-відповідності (0,44). Водночас інтенсивність екологічного впливу становить 0,57, що свідчить про підвищений рівень екологічного навантаження. Отриманий результат відображає перехідний стан підприємства між середнім та низьким рівнем екологічної ефективності.

Найнижче значення інтегрального показника було отримано для Об'єкта D – 0,27. Це пояснюється низькими значеннями рівня енергоефективності виробництва (0,29), ефективності використання ресурсів і матеріалів (0,34) та ESG-екологічної відповідності (0,26). Крім того, для даного об'єкта зафіксовано найвище значення інтенсивності екологічного впливу – 0,76, що свідчить про значний негативний вплив виробничої

діяльності на навколишнє середовище. Отриманий результат характеризує підприємство як екологічно нестійке та недостатньо адаптоване до сучасних вимог біосферосумісного розвитку.

Порівняльний аналіз результатів моделювання підтверджує, що запропонована нечітко-логічна модель адекватно реагує на зміну екологічних параметрів та забезпечує логічно узгоджене формування інтегрального показника екологічної та біосферосумісної ефективності. Зі зростанням рівня енергоефективності, ефективності використання ресурсів та ESG-відповідності спостерігається відповідне підвищення інтегрального показника Out3. Особливістю даної підсистеми є врахування як позитивних, так і негативних екологічних факторів. Зокрема, змінна «інтенсивність екологічного впливу» має обернений характер впливу на фінальний результат, що дозволяє більш реалістично моделювати екологічний стан підприємства.

Важливою перевагою запропонованого підходу є можливість інтеграції ESG-параметрів, ресурсної ефективності та екологічних характеристик у межах єдиної системи оцінювання. Це дозволяє розглядати екологічну ефективність не лише як окремий технічний параметр, а як комплексну характеристику сучасної системи управління підприємством.

Для перевірки ефективності роботи підсистеми Out4 було проведено моделювання рівня стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості для п'яти будівельних підприємств, які характеризуються різним рівнем соціальної відповідальності, організації трудового середовища та ефективності взаємодії зі стейкхолдерами. Основною метою апробації є оцінювання здатності нечітко-логічної моделі адекватно відображати вплив соціально-організаційних параметрів на інтегральний рівень людиноцентричної орієнтованості системи управління підприємством. Отримані результати представляє таблиця 5.4, рис. 5.4.

Найвище значення інтегрального показника Out4 було отримано для Об'єкта Е і становило 0,92. Такий результат пояснюється високими значеннями всіх вхідних параметрів: безпека та якість трудового середовища

становить 0,91, задоволеність стейкхолдерів – 0,89, рівень корпоративної соціальної відповідальності – 0,94, а ефективність комунікаційної взаємодії – 0,92. Отриманий результат свідчить про високий рівень соціальної орієнтованості підприємства, ефективну взаємодію із зацікавленими сторонами та сформовану систему людиноцентричного управління.

Таблиця 5.4

Результати використання підсистеми Out4 «Стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість»

Показник	Назва	Об'єкт А	Об'єкт В	Об'єкт С	Об'єкт D	Об'єкт Е
In13	Безпека та якість трудового середовища	0,82	0,68	0,49	0,33	0,91
In14	Задоволеність стейкхолдерів	0,76	0,61	0,46	0,29	0,89
In15	Рівень корпоративної соціальної відповідальності	0,79	0,64	0,43	0,31	0,94
In16	Ефективність комунікаційної взаємодії	0,74	0,59	0,51	0,36	0,92
Out4	Стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість	0,78	0,63	0,47	0,32	0,92

Джерело: розроблено автором.

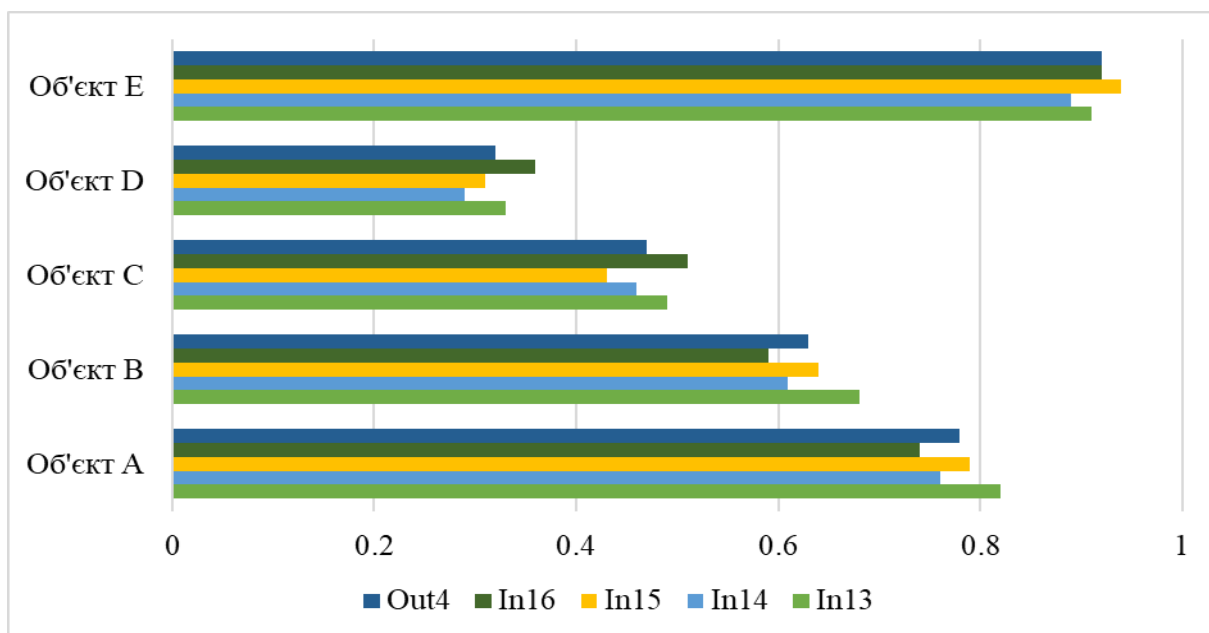


Рис. 5.4. Результати використання підсистеми Out4 «Стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість»

Джерело: розроблено автором.

Високий рівень інтегрального показника також продемонстрував Об'єкт А, для якого значення Out4 становило 0,78. Підприємство характеризується достатньо високими значеннями безпеки трудового середовища (0,82), задоволеності стейкхолдерів (0,76), рівня корпоративної соціальної відповідальності (0,79) та ефективності комунікаційної взаємодії (0,74). Отриманий результат свідчить про стабільне функціонування соціально-організаційної системи підприємства та ефективне врахування інтересів ключових груп стейкхолдерів.

Для Об'єкта В інтегральний показник стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості становив 0,63, що відповідає середньому рівню розвитку соціально-управлінської системи. Значення окремих параметрів також перебувають у середньому діапазоні: безпека та якість трудового середовища становить 0,68, задоволеність стейкхолдерів – 0,61, рівень корпоративної соціальної відповідальності – 0,64, а ефективність комунікаційної взаємодії – 0,59. Отриманий результат свідчить про наявність базових елементів соціально відповідального управління, однак окремі компоненти системи ще потребують подальшого вдосконалення.

Об'єкт С отримав значення інтегрального показника Out4 на рівні 0,47. При цьому значення вхідних параметрів є помірно низькими: безпека та якість трудового середовища становить 0,49, задоволеність стейкхолдерів – 0,46, рівень корпоративної соціальної відповідальності – 0,43, а ефективність комунікаційної взаємодії – 0,51. Отриманий результат свідчить про часткове впровадження людиноцентричного підходу та недостатню ефективність окремих соціально-комунікаційних процесів.

Найнижче значення інтегрального показника було отримано для Об'єкта D – 0,32. Це пояснюється низькими значеннями всіх вхідних параметрів: безпека та якість трудового середовища становить 0,33, задоволеність стейкхолдерів – 0,29, рівень корпоративної соціальної відповідальності – 0,31, а ефективність комунікаційної взаємодії – 0,36. Такий результат свідчить про недостатній рівень соціальної відповідальності підприємства, слабку

взаємодію зі стейкхолдерами та наявність проблем у системі організації комунікаційних процесів.

Порівняльний аналіз результатів моделювання підтверджує, що запропонована нечітко-логічна модель адекватно реагує на зміну соціально-організаційних параметрів та забезпечує логічно узгоджене формування інтегрального показника стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості. Зі зростанням рівня корпоративної соціальної відповідальності, якості трудового середовища та ефективності комунікаційної взаємодії спостерігається відповідне підвищення інтегрального показника Out4. Особливістю запропонованого підходу є можливість інтеграції соціальних, організаційних та комунікаційних характеристик підприємства в межах єдиної системи оцінювання. Це дозволяє розглядати людиноцентричну орієнтованість не як окремий соціальний параметр, а як комплексну характеристику сучасної системи управління будівельним підприємством.

Важливою перевагою моделі є її здатність враховувати складні взаємозв'язки між соціальною відповідальністю, задоволеністю стейкхолдерів та ефективністю внутрішніх комунікацій. Саме такі взаємозалежності мають критичне значення для функціонування сучасних будівельних підприємств, діяльність яких характеризується високим рівнем координаційної складності та значною кількістю учасників проєктів.

Для перевірки працездатності підсистеми Out5 було проведено моделювання рівня організаційно-інноваційної стійкості для п'яти будівельних підприємств, які характеризуються різним рівнем адаптивності системи управління, інноваційної активності, ризикостійкості та стратегічної гнучкості. Основною метою апробації є оцінювання здатності нечітко-логічної моделі адекватно відображати вплив організаційно-управлінських та інноваційних параметрів на інтегральний рівень стійкості підприємства в умовах цифрової економіки та високої невизначеності зовнішнього середовища. Отримані результати презентує таблиця 5.5, рис. 5.5.

Таблиця 5.5

Результати використання підсистеми Out5 «Організаційно-інноваційна стійкість»

Показник	Назва	Об'єкт А	Об'єкт В	Об'єкт С	Об'єкт D	Об'єкт Е
In17	Адаптивність системи управління	0,78	0,64	0,47	0,35	0,92
In18	Інноваційна активність підприємства	0,81	0,59	0,44	0,28	0,95
In19	Ризикостійкість підприємства	0,74	0,62	0,48	0,31	0,89
In20	Стратегічна організаційна гнучкість	0,77	0,58	0,46	0,33	0,93
Out5	Організаційно-інноваційна стійкість	0,78	0,61	0,46	0,32	0,92

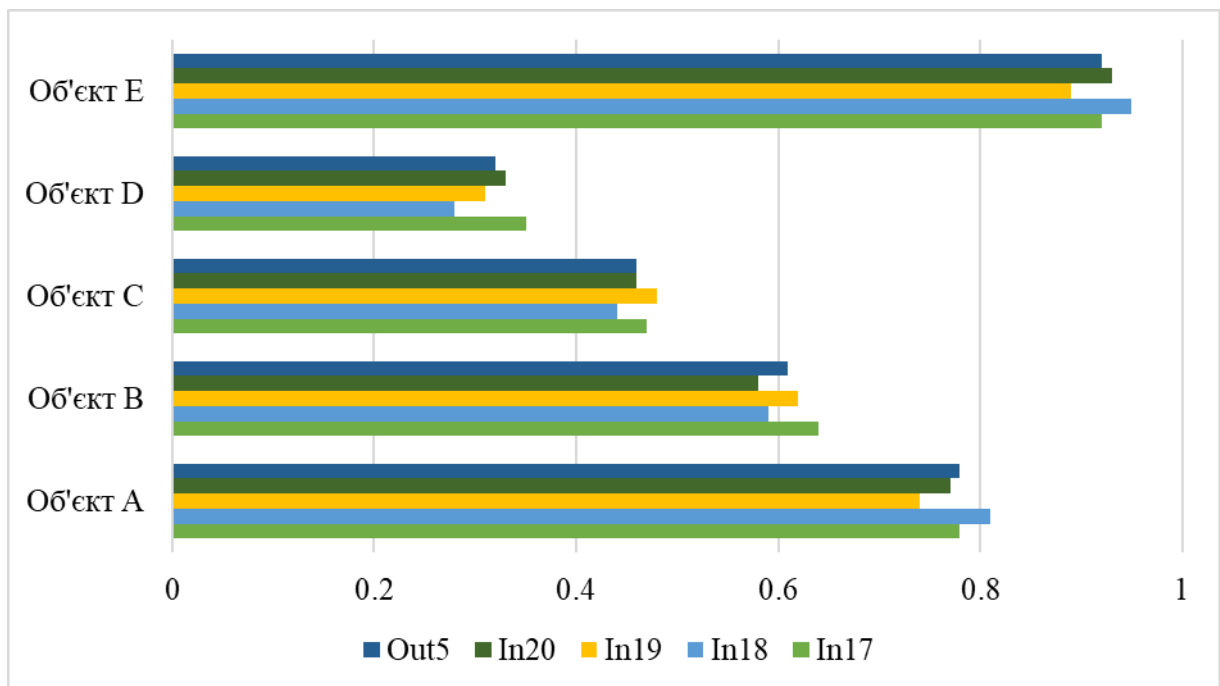


Рис. 5.5. Результати використання підсистеми Out5 «Організаційно-інноваційна стійкість»

Джерело: розроблено автором.

Найвище значення інтегрального показника Out5 було отримано для Об'єкта Е і становило 0,92. Такий результат пояснюється високими

значеннями всіх вхідних параметрів: адаптивність системи управління становить 0,92, інноваційна активність підприємства – 0,95, ризикостійкість – 0,89, а стратегічна організаційна гнучкість – 0,93. Отриманий результат характеризує підприємство як високостійку та інноваційно орієнтовану організацію, здатну ефективно реагувати на зміни зовнішнього середовища, інтегрувати нові технології та підтримувати стабільність функціонування в умовах цифрової трансформації.

Високий рівень організаційно-інноваційної стійкості також продемонстрував Об'єкт А, для якого значення інтегрального показника становило 0,78. Підприємство характеризується достатньо високими значеннями адаптивності системи управління (0,78), інноваційної активності (0,81), ризикостійкості (0,74) та стратегічної організаційної гнучкості (0,77). Отриманий результат свідчить про сформовану систему організаційного управління, здатність підприємства підтримувати інноваційний розвиток та ефективно адаптуватися до змін ринкового середовища.

Для Об'єкта В інтегральний показник організаційно-інноваційної стійкості становив 0,61, що відповідає середньому рівню розвитку системи управління. Значення окремих параметрів також перебувають у середньому діапазоні: адаптивність системи управління становить 0,64, інноваційна активність – 0,59, ризикостійкість – 0,62, а стратегічна організаційна гнучкість – 0,58. Отриманий результат свідчить про наявність базових механізмів адаптації та інноваційного розвитку, однак окремі компоненти організаційної системи ще потребують подальшого вдосконалення.

Об'єкт С отримав значення інтегрального показника Out5 на рівні 0,46. Для даного підприємства характерними є помірно низькі значення адаптивності системи управління (0,47), інноваційної активності (0,44), ризикостійкості (0,48) та стратегічної організаційної гнучкості (0,46). Отриманий результат свідчить про часткову здатність підприємства до організаційної трансформації та інноваційного розвитку, однак рівень

стійкості системи управління ще залишається недостатнім для ефективного функціонування в умовах високої невизначеності.

Найнижче значення інтегрального показника було отримано для Об'єкта D – 0,32. Це пояснюється низькими значеннями всіх вхідних параметрів: адаптивність системи управління становить 0,35, інноваційна активність – 0,28, ризикостійкість – 0,31, а стратегічна організаційна гнучкість – 0,33. Такий результат свідчить про низький рівень готовності підприємства до функціонування в умовах цифрової економіки, недостатню ефективність системи управління ризиками та обмежені можливості реалізації стратегічних змін.

Порівняльний аналіз результатів моделювання підтверджує, що запропонована нечітко-логічна модель адекватно реагує на зміну організаційно-управлінських параметрів та забезпечує логічно узгоджене формування інтегрального показника організаційно-інноваційної стійкості. Зі збільшенням рівня адаптивності системи управління, інноваційної активності та стратегічної гнучкості спостерігається відповідне зростання інтегрального показника Out5. Особливістю даної підсистеми є інтеграція організаційних, інноваційних та ризикоорієнтованих характеристик у межах єдиної системи оцінювання. Це дозволяє розглядати організаційно-інноваційну стійкість як комплексну характеристику здатності підприємства підтримувати ефективне функціонування та розвиток в умовах нестабільного зовнішнього середовища.

Важливою перевагою моделі є також можливість врахування взаємозв'язків між інноваційною активністю, адаптивністю та ризикостійкістю. У сучасних умовах цифрової трансформації саме поєднання цих компонентів визначає здатність підприємства забезпечувати довгострокову конкурентоспроможність та ефективно реалізовувати стратегії розвитку.

Завершальним етапом практичної апробації запропонованої багаторівневої нечітко-логічної системи стало формування інтегрального індексу IDEM, який відображає загальний рівень ефективності економіко-

цифрового управління будівельними підприємствами в умовах цифрової економіки та біосферосумісного розвитку. Основною метою даного етапу є оцінювання здатності верхнього рівня моделі інтегрувати результати роботи всіх функціональних підсистем у межах єдиного узагальнюючого показника. Отримані результати презентує таблиця 5.6, рис. 5.6.

Таблиця 5.6

Результати використання системи IDEM «Інтегральний індекс ефективності економіко-цифрового управління»

Показник	Назва	Об'єкт А	Об'єкт В	Об'єкт С	Об'єкт D	Об'єкт Е
Out1	Економічна результативність підприємства	0,74	0,6	0,41	0,3	0,84
Out2	Цифрова зрілість управління	0,77	0,62	0,46	0,33	0,9
Out3	Екологічна та біосферосумісна ефективність	0,73	0,58	0,45	0,27	0,9
Out4	Стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість	0,78	0,63	0,47	0,32	0,92
Out5	Організаційно-інноваційна стійкість	0,78	0,61	0,46	0,32	0,92
IDEM	Інтегральний індекс ефективності економіко-цифрового управління	0,76	0,61	0,45	0,31	0,9

Джерело: розроблено автором.

Найвище значення інтегрального індексу IDEM було отримано для Об'єкта Е і становило 0,90. Такий результат пояснюється стабільно високими значеннями всіх функціональних компонентів системи. Зокрема, економічна результативність підприємства становить 0,84, цифрова зрілість управління – 0,90, екологічна та біосферосумісна ефективність – 0,90, стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість – 0,92, а організаційно-інноваційна стійкість – 0,92. Отриманий результат характеризує підприємство як високоефективну

цифрово інтегровану систему управління, здатну забезпечувати стійкий розвиток в умовах сучасних економічних, екологічних та технологічних викликів.

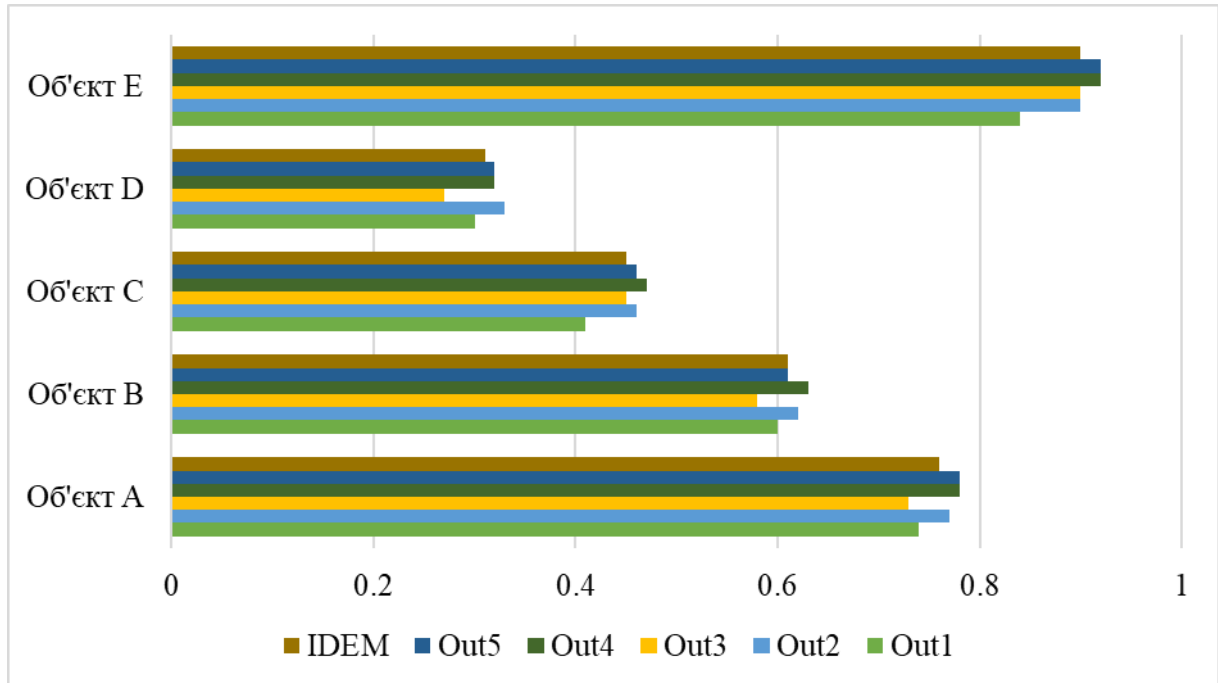


Рис. 5.6. Результати використання системи IDEM «Інтегральний індекс ефективності економіко-цифрового управління»

Джерело: розроблено автором.

Високе значення інтегрального індексу також продемонстрував Об'єкт А, для якого IDEM становить 0,76. Підприємство характеризується високими значеннями всіх функціональних компонентів: економічна результативність – 0,74, цифрова зрілість управління – 0,77, екологічна ефективність – 0,73, стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість – 0,78, організаційно-інноваційна стійкість – 0,78. Отриманий результат свідчить про збалансований розвиток підприємства та достатньо високий рівень інтеграції економічних, цифрових, екологічних та організаційних компонентів системи управління.

Для Об'єкта В значення інтегрального індексу IDEM становило 0,61, що відповідає середньому рівню ефективності економіко-цифрового управління. Значення окремих функціональних компонентів також

перебувають у середньому діапазоні: економічна результативність становить 0,60, цифрова зрілість – 0,62, екологічна ефективність – 0,58, стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість – 0,63, а організаційно-інноваційна стійкість – 0,61. Отриманий результат характеризує підприємство як стабільну систему з базовим рівнем цифрової та організаційної трансформації, однак із потребою подальшого вдосконалення окремих напрямів управління.

Об'єкт С отримав значення інтегрального індексу IDEM на рівні 0,45. Для даного підприємства характерними є помірно низькі значення всіх функціональних компонентів: економічна результативність становить 0,41, цифрова зрілість – 0,46, екологічна ефективність – 0,45, стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість – 0,47, а організаційно-інноваційна стійкість – 0,46. Отриманий результат свідчить про перехідний стан підприємства та недостатній рівень інтегрованості ключових компонентів системи управління.

Найнижче значення інтегрального індексу було отримано для Об'єкта D – 0,31. Такий результат пояснюється низькими значеннями всіх функціональних підсистем: економічна результативність становить 0,30, цифрова зрілість управління – 0,33, екологічна ефективність – 0,27, стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість – 0,32, а організаційно-інноваційна стійкість – 0,32. Отриманий результат свідчить про низький рівень ефективності системи економіко-цифрового управління та недостатню готовність підприємства до функціонування в умовах цифрової економіки та сучасних вимог сталого розвитку.

Порівняльний аналіз результатів моделювання підтверджує, що запропонована багаторівнева нечітко-логічна модель забезпечує логічно узгоджене формування інтегрального індексу IDEM та адекватно реагує на зміну параметрів окремих функціональних компонентів. Зі зростанням рівня економічної результативності, цифрової зрілості, екологічної ефективності та організаційної стійкості спостерігається відповідне зростання фінального інтегрального показника. Особливістю запропонованого підходу є можливість інтеграції різномірних економічних, цифрових, екологічних, соціальних та

організаційних параметрів у межах єдиної системи оцінювання. Це дозволяє розглядати ефективність економіко-цифрового управління як комплексну багатокомпонентну характеристику сучасного будівельного підприємства.

Важливою перевагою моделі IDEM є її здатність відображати проміжні стани розвитку підприємств. На відміну від класичних підходів із жорсткими пороговими межами, нечітко-логічна система дозволяє враховувати часткову належність підприємства до різних рівнів ефективності, що забезпечує більш реалістичне моделювання управлінських процесів. Результати проведеного моделювання свідчать, що підприємства, для яких характерні відносно збалансовані значення функціональних компонентів Out1–Out5, формують середній або високий рівень інтегрального індексу IDEM навіть за наявності окремих слабших параметрів. Це підтверджує, що ефективність економіко-цифрового управління визначається не окремим локальним показником, а комплексною взаємодією економічних, цифрових, екологічних, соціальних та організаційних складових системи управління.

Водночас накопичення низьких значень за більшістю функціональних компонентів призводить до суттєвого зниження інтегрального показника IDEM. Такі результати свідчать про недостатній рівень цифрової зрілості, організаційної стійкості та управлінської адаптивності підприємства, що обмежує його здатність до ефективної реалізації стратегічних програм розвитку, впровадження цифрових технологій та забезпечення конкурентоспроможності в умовах сучасного ринку будівельних послуг.

Отримані результати підтверджують, що запропонована багаторівнева нечітко-логічна модель є ефективним інструментом комплексного оцінювання ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами в умовах невизначеності, неповноти інформації та значної частки якісних параметрів. Використання апарату нечіткої логіки дозволяє інтегрувати різноманітні показники у межах єдиної системи оцінювання та формувати не лише кількісну інтегральну оцінку, але й аналітичну основу для виявлення проблемних компонентів системи управління.

Практична апробація також підтвердила здатність моделі адекватно реагувати на зміну вхідних параметрів та відображати проміжні стани розвитку підприємств. Це має особливе значення для будівельної галузі, де процеси цифрової трансформації, впровадження ESG-принципів та організаційної модернізації часто мають поступовий і нерівномірний характер. Запропонована модель може використовуватися як інструмент підтримки управлінських рішень під час стратегічного планування розвитку підприємств, оцінювання рівня їхньої цифрової трансформації, аналізу готовності до впровадження біосферосумісних технологій будівництва та реалізації ESG-орієнтованих стратегій розвитку. Крім того, інтегральний індекс IDEM може застосовуватися у процедурах порівняльного аналізу підприємств, сценарного моделювання, багатокритеріального оцінювання та подальшого імітаційного аналізу.

Підсумовуючи, варто зазначити, що результати практичного застосування розробленої багаторівневої нечітко-логічної моделі підтверджують її прикладну цінність та можливість інтеграції у сучасні системи підтримки управління будівельними підприємствами. Отримані результати створюють основу для формування обґрунтованих управлінських рекомендацій щодо підвищення ефективності економіко-цифрового управління, забезпечення організаційної стійкості та підтримки біосферосумісного розвитку підприємств в умовах цифрової економіки.

5.2. Аналітична верифікація, оцінювання стійкості та сценарна інтерпретація інтегрального індексу IDEM

Сучасні умови функціонування будівельних підприємств характеризуються високим рівнем невизначеності, складністю управлінських процесів та необхідністю одночасного врахування економічних, цифрових, екологічних і організаційних факторів. Традиційні підходи до оцінювання ефективності управління часто орієнтовані на використання статичних або

детермінованих моделей, які не дозволяють повною мірою враховувати багатофакторний характер реального середовища функціонування підприємства. Особливо це проявляється в умовах цифрової трансформації будівельної галузі, посилення екологічних вимог та зростання потреби у забезпеченні стійкого розвитку підприємств.

Застосування методу Latin Hypercube Sampling дозволило сформувати репрезентативний набір сценаріїв, що відображають різні комбінації економічної результативності, цифрової зрілості, екологічної ефективності, стейкхолдерної орієнтованості та організаційної стійкості підприємства. У результаті було створено багатовимірний простір сценаріїв, який дозволяє аналізувати поведінку інтегрального індексу IDEM в умовах невизначеності.

Разом із тим сама побудова сценарного простору та проведення статистичного аналізу не є кінцевою метою дослідження. Основне практичне значення запропонованої моделі полягає у можливості її використання як інструменту підтримки управлінських рішень у реальних умовах функціонування будівельних підприємств. Саме тому наступним етапом дослідження є практична апробація результатів імітаційного моделювання та аналізу стійкості моделі IDEM.

Практичне використання моделі базується на тому, що інтегральний індекс IDEM виступає комплексним індикатором ефективності економіко-цифрового управління підприємством. На відміну від традиційних систем оцінювання, які зазвичай аналізують окремі показники ізольовано, запропонований підхід дозволяє враховувати взаємозв'язки між різними групами факторів та їх сумарний вплив на стан системи управління. Це створює передумови для більш об'єктивного аналізу функціонування підприємства та підвищення обґрунтованості управлінських рішень.

Особливістю запропонованого підходу є поєднання нечіткої логіки з імітаційним моделюванням невизначеності. У практичному середовищі управління будівельними підприємствами значна частина параметрів не може бути описана абсолютно точними значеннями. Наприклад, цифрова зрілість

управління, рівень організаційної адаптивності або стейкхолдерна орієнтованість часто мають експертний або нечіткий характер. У таких умовах використання класичних математичних моделей є недостатньо ефективним, оскільки вони вимагають жорстко визначених параметрів та лінійних залежностей між ними.

Застосування Fuzzy Logic дозволяє враховувати нечіткість управлінських оцінок через використання лінгвістичних термів. Водночас використання Latin Hypercube Sampling забезпечує формування великої кількості альтернативних сценаріїв функціонування системи. Поєднання цих підходів створює гібридну систему підтримки прийняття рішень, здатну працювати в умовах складної багатофакторної невизначеності.

Практична цінність моделі IDEM також полягає у можливості оцінювання стійкості системи управління підприємством. У сучасних умовах будівельна галузь функціонує в середовищі постійних змін, пов'язаних із трансформацією цифрових технологій, нестабільністю ринку, змінами екологічних вимог та ризиками ресурсного забезпечення. У таких умовах ефективною може вважатися лише та система управління, яка здатна зберігати стабільність результатів при зміні зовнішніх і внутрішніх факторів.

Саме тому аналіз стійкості моделі IDEM є важливим елементом практичного застосування результатів моделювання. Використання сценарного аналізу дозволяє дослідити поведінку інтегрального індексу в різних умовах функціонування підприємства та визначити критичні фактори, які найбільше впливають на загальну ефективність системи управління. Це створює можливість не лише оцінювати поточний стан підприємства, але й прогнозувати потенційні ризики погіршення ефективності управління.

Крім того, практичне використання моделі створює основу для формування адаптивних систем управління підприємством. Завдяки можливості аналізу великої кількості сценаріїв керівництво підприємства отримує інструмент для оцінювання потенційних наслідків управлінських рішень ще до їх практичної реалізації. У результаті модель IDEM може

використовуватись не лише як система оцінювання, але й як інструмент підтримки стратегічного прогнозування.

У зв'язку із зазначеним, подальший аналіз буде спрямований на практичну інтерпретацію результатів сценарного моделювання, оцінювання впливу окремих компонентів системи на інтегральний індекс IDEM, а також визначення можливостей використання запропонованої моделі у процесах економіко-цифрового управління будівельними підприємствами. Особлива увага приділятиметься питанням стійкості системи, чутливості інтегрального індексу до зміни параметрів та формуванню управлінських висновків на основі результатів імітаційного моделювання.

У межах практичної реалізації запропонованої моделі IDEM було виконано імітаційне сценарне моделювання на основі методу Latin Hypercube Sampling. Основною метою даного етапу стало формування репрезентативного набору сценаріїв функціонування системи економіко-цифрового управління будівельним підприємством в умовах багатофакторної невизначеності.

Використання нормалізованого простору забезпечило уніфікацію параметрів моделі та створило можливість коректного поєднання різномірних управлінських характеристик у межах єдиної нечітко-логічної системи. Крім того, такий підхід дозволив ефективно інтегрувати результати сценарного моделювання з механізмом фазифікації та системою нечітких правил алгоритму Mamdani. Генерація сценаріїв здійснювалася за допомогою методу Latin Hypercube Sampling, який забезпечує рівномірне покриття багатовимірного простору параметрів. На відміну від класичних випадкових методів генерації даних, LHS дозволяє мінімізувати концентрацію сценаріїв у окремих областях простору змінних та забезпечити більш репрезентативне представлення можливих станів системи.

У результаті проведеного моделювання було сформовано датасет, що містив 3334 сценарії функціонування системи економіко-цифрового управління підприємством. Кожен запис датасету являв собою окрему

комбінацію параметрів Out1–Out5 та відповідне значення інтегрального індексу IDEM, отримане після проходження сценарію через верхній рівень нечітко-логічної моделі.

Кожен із 3334 сценаріїв відображав окремий можливий стан системи управління підприємством в умовах зміни економічних, цифрових, екологічних та організаційних характеристик. У результаті було сформовано багатовимірний простір сценаріїв, який дозволяє досліджувати поведінку інтегрального індексу IDEM не лише для одного детермінованого випадку, а для широкого спектра альтернативних умов функціонування підприємства.

Особливістю сформованого набору даних є його висока варіативність. У межах датасету представлені як сценарії з низькими значеннями окремих параметрів, так і комбінації, що характеризуються високим рівнем цифрової зрілості, організаційної адаптивності або економічної результативності. Це дозволило забезпечити репрезентативність сценарного простору та створити основу для подальшого статистичного аналізу поведінки моделі.

Після генерації сценаріїв кожен запис послідовно подавався на вхід верхнього рівня нечітко-логічної системи IDEM. Далі виконувалися етапи фазифікації параметрів, активації бази правил, агрегації результатів та дефазифікації вихідного показника. У результаті для кожної комбінації параметрів формувалося окреме значення інтегрального індексу IDEM.

Таким чином було отримано не одне статичне значення інтегрального індексу, а повний розподіл результатів моделювання, який відображає поведінку системи економіко-цифрового управління в умовах невизначеності. Саме це створює можливість для проведення подальшого аналізу стійкості моделі, оцінювання чутливості параметрів та визначення найбільш критичних факторів впливу на інтегральний індекс IDEM.

Практичне значення сформованого датасету також полягає у можливості його подальшого використання для задач прогнозування, машинного навчання та побудови сурогатних моделей. Завдяки великій кількості сценаріїв створюється цифровий простір експериментальних даних, який

дозволяє досліджувати закономірності функціонування системи управління та оцінювати її поведінку в різних умовах функціонування будівельного підприємства.

На рис. 5.7 представлено гістограму розподілу значень інтегрального індексу IDEM, отриманих у результаті сценарного моделювання на основі методу Latin Hypercube Sampling. Гістограма відображає частотний розподіл значень інтегрального показника для сформованого набору із 3334 сценаріїв функціонування системи економіко-цифрового управління будівельним підприємством.

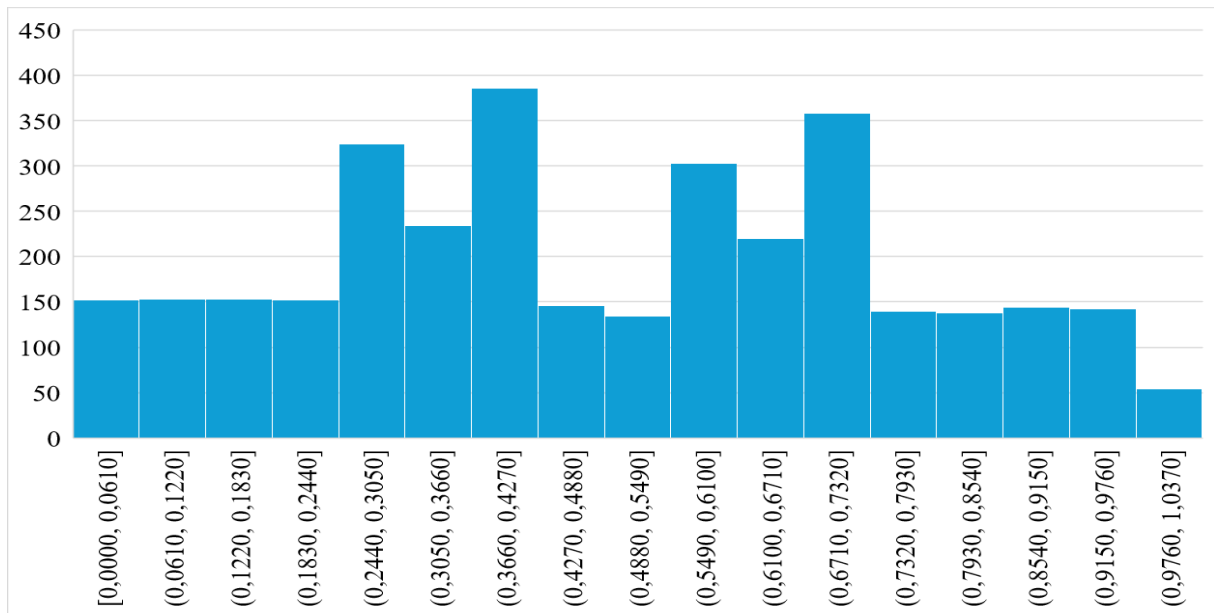


Рис. 5.7. Гістограма розподілу інтегрального індексу IDEM за результатами сценарного моделювання методом Latin Hypercube Sampling

Джерело: розроблено автором.

Отриманий розподіл характеризується достатньо широким покриттям простору значень інтегрального індексу – від низьких до високих рівнів IDEM. Це свідчить про те, що сформований сценарний простір охоплює як несприятливі, так і ефективні варіанти функціонування системи управління

підприємством. Таким чином, модель дозволяє аналізувати поведінку інтегрального індексу в умовах значної багатофакторної невизначеності.

Аналіз гістограми показує, що найбільша концентрація сценаріїв спостерігається в середньому діапазоні значень IDEM, зокрема в інтервалах приблизно 0,24–0,43 та 0,55–0,73. Це може свідчити про наявність декількох домінуючих режимів функціонування системи економіко-цифрового управління. У межах сформованого сценарного простору модель частіше формує середні та помірно високі значення інтегрального індексу, що вказує на відносно збалансований характер взаємодії між компонентами Out1–Out5.

Водночас у розподілі присутні також сценарії з низькими та дуже високими значеннями IDEM, однак їх частота є меншою. Це свідчить про те, що крайні стани системи виникають рідше та потребують специфічних комбінацій параметрів верхнього рівня моделі. Подібна поведінка є характерною для багаторівневих нечітко-логічних систем, у яких результат формується внаслідок нелінійної взаємодії між окремими компонентами моделі та базою нечітких правил.

Отриманий розподіл також підтверджує ефективність використання методу Latin Hypercube Sampling. Сценарії рівномірно охоплюють простір параметрів, що забезпечує репрезентативність результатів моделювання та дозволяє уникнути надмірної концентрації значень лише в окремих діапазонах інтегрального індексу. Це є важливим для подальшого статистичного аналізу, аналіз чутливості та оцінювання стійкості моделі IDEM.

З точки зору практичної інтерпретації результати гістограми свідчать про те, що система економіко-цифрового управління будівельним підприємством має здатність функціонувати у широкому спектрі умов, однак найбільш ймовірними є сценарії зі середнім або помірно високим рівнем інтегральної ефективності. Це підтверджує адаптивний характер запропонованої моделі та її придатність для аналізу складних багатофакторних управлінських систем в умовах цифрової економіки та біосферосумісного розвитку.

У таблиці 5.7 наведено результати базового статистичного аналізу агрегованих показників верхнього рівня моделі IDEM, отриманих у результаті сценарного моделювання методом Latin Hypercube Sampling. Аналіз охоплює середні значення, медіани та стандартні відхилення для параметрів Out1–Out5, які характеризують ключові компоненти системи економіко-цифрового управління будівельним підприємством.

Таблиця 5.7

Основні статистичні характеристики агрегованих показників моделі IDEM

Показник	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5
Середнє значення	0,4905	0,4958	0,4945	0,5021	0,5008
Медіана	0,4711	0,4835	0,4797	0,5078	0,5058
Стандартне відхилення	0,2594	0,2630	0,2609	0,2589	0,2582

Джерело: розроблено автором.

Отримані результати свідчать про високий рівень збалансованості сформованого сценарного простору. Середні значення всіх агрегованих показників знаходяться поблизу центральної області нормалізованого діапазону $[0;1]$ та змінюються в межах приблизно від 0,4905 до 0,5021. Це вказує на те, що під час генерації сценаріїв модель не була зміщена в бік надмірно низьких або надмірно високих значень окремих компонентів системи управління.

Найвище середнє значення спостерігається для показника Out4, який характеризує стейкхолдерно-людиноцентричну орієнтованість системи управління. Водночас найнижче середнє значення отримано для Out1 – економічної результативності підприємства. Однак різниця між показниками є незначною, що свідчить про відносно рівномірне покриття сценарного простору та відсутність домінування окремих компонентів моделі.

Медіанні значення також знаходяться поблизу середини діапазону та є близькими до відповідних середніх значень. Це свідчить про достатньо симетричний характер розподілу результатів моделювання та відсутність

критичного впливу екстремальних сценаріїв на структуру вибірки. Найближчі значення середнього та медіани спостерігаються для показників Out4 та Out5, що може свідчити про більш стабільний характер розподілу відповідних компонентів системи управління.

Для показників Out1–Out3 медіана є дещо нижчою за середнє значення, що може вказувати на незначну правосторонню асиметрію розподілу. Це означає, що в сценарному просторі присутня певна кількість сценаріїв із підвищеними значеннями відповідних показників, які дещо зміщують середнє значення у бік більших величин. Однак величина цього зміщення є невеликою, тому загалом розподіл можна вважати достатньо збалансованим.

Стандартні відхилення для всіх агрегованих показників мають дуже близькі значення та знаходяться в межах приблизно 0,258–0,263. Це свідчить про однорідний рівень варіативності параметрів у сформованому сценарному просторі. Відсутність значних відмінностей між стандартними відхиленнями підтверджує, що всі компоненти моделі IDEM брали участь у сценарному моделюванні приблизно з однаковим рівнем варіативності. Найвище стандартне відхилення спостерігається для показника Out2, який характеризує цифрову зрілість управління. Це може свідчити про дещо більшу чутливість цифрових характеристик системи до варіацій сценарних параметрів. Водночас найменше стандартне відхилення отримано для Out5 – організаційно-інноваційної стійкості, що може вказувати на відносно стабільніший характер розподілу цього компонента.

Загалом отримані статистичні характеристики підтверджують репрезентативність сформованого датасету та ефективність використання Latin Hypercube Sampling для генерації сценаріїв моделювання. Рівномірність середніх значень і близькі показники варіативності свідчать про збалансоване покриття багатовимірного простору параметрів та створюють належну основу для подальшого аналізу інтегрального індексу IDEM, аналіз чутливості та оцінювання стійкості системи економіко-цифрового управління будівельними підприємствами.

На рис. 5.8 наведено порівняльний аналіз основних статистичних характеристик агрегованих показників верхнього рівня моделі IDEM, отриманих у результаті сценарного моделювання методом Latin Hypercube Sampling. Графік відображає середні значення, медіани та стандартні відхилення для показників Out1–Out5, що характеризують економічні, цифрові, екологічні, стейкхолдерні та організаційно-інноваційні складові системи управління будівельним підприємством.

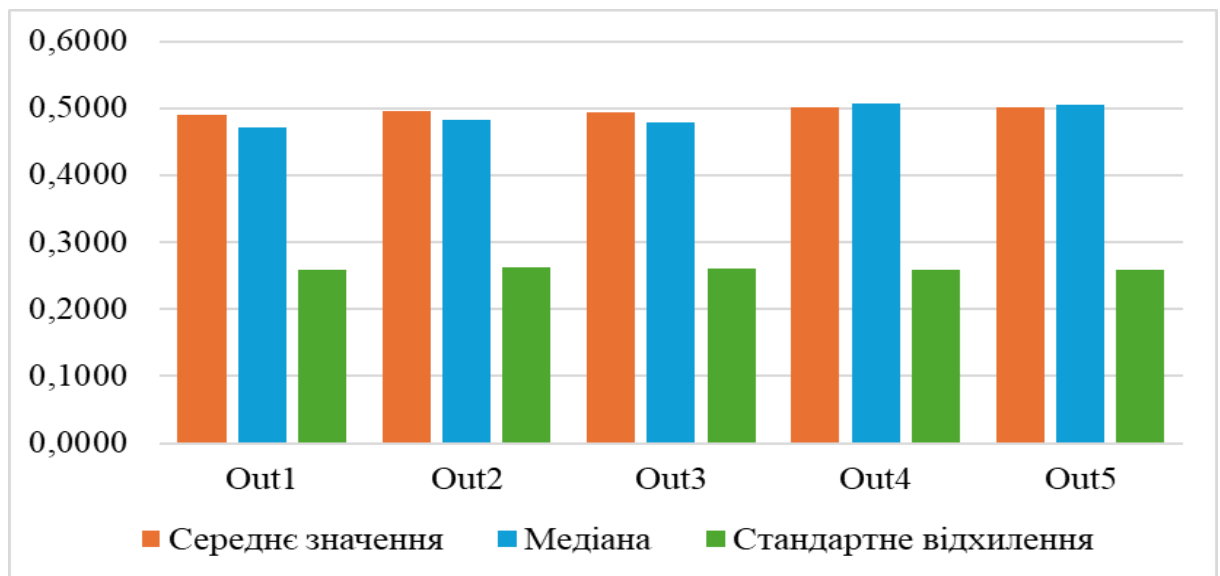


Рис. 5.8. Порівняння середніх значень, медіан та стандартних відхилень агрегованих показників моделі IDEM

Джерело: розроблено автором.

Отримані результати демонструють високий рівень збалансованості сформованого сценарного простору. Середні значення всіх агрегованих показників знаходяться поблизу центральної області нормалізованого діапазону та мають дуже близькі величини. Це свідчить про рівномірне покриття багатовимірного простору параметрів у процесі генерації сценаріїв та відсутність структурного зміщення моделі в бік окремих компонентів системи управління.

Показники медіани також мають значення, близькі до середніх, що підтверджує відносно симетричний характер розподілу результатів

моделювання. Для більшості параметрів різниця між середнім значенням та медіаною є незначною, що свідчить про відсутність критичного впливу екстремальних сценаріїв на структуру вибірки. Найбільш близькі значення середнього та медіани спостерігаються для Out4 та Out5, що може вказувати на підвищену стабільність відповідних компонентів системи економіко-цифрового управління.

Водночас для Out1–Out3 медіанні значення є дещо нижчими за середні, що свідчить про незначну правосторонню асиметрію розподілу. Це означає, що у сценарному просторі присутні окремі сценарії з підвищеними значеннями відповідних параметрів, які зміщують середнє значення у бік більших величин. Однак масштаби такого зміщення залишаються незначними, тому загальна структура розподілу зберігає достатньо стабільний характер.

Стандартні відхилення для всіх агрегованих показників мають майже однаковий рівень та знаходяться приблизно в межах 0,26. Це підтверджує однорідний рівень варіативності параметрів та свідчить про збалансованість сформованого датасету. Відсутність суттєвих відмінностей між стандартними відхиленнями означає, що всі компоненти моделі брали участь у процесі сценарного моделювання з приблизно однаковим рівнем варіативності. Найвище стандартне відхилення спостерігається для показника Out2, який характеризує цифрову зрілість управління. Це може свідчити про дещо більшу чутливість цифрових характеристик системи до зміни сценарних параметрів. Водночас показник Out5 демонструє найменшу варіативність, що може вказувати на відносно стабільніший характер організаційно-інноваційної складової моделі.

Загалом результати, представлені на рисунку, підтверджують ефективність використання Latin Hypercube Sampling для формування сценарного простору моделі IDEM. Отримані статистичні характеристики свідчать про репрезентативність сформованого набору даних, збалансованість структури сценаріїв та придатність моделі до подальшого аналізу стійкості,

аналіз чутливості та оцінювання поведінки інтегрального індексу IDEM в умовах багатофакторної невизначеності.

У таблиці 5.8 наведено результати аналізу статистичних меж та перцентильних характеристик агрегованих показників верхнього рівня моделі IDEM, отриманих у результаті сценарного моделювання методом Latin Hypercube Sampling. Представлені показники дозволяють оцінити структуру розподілу результатів, межі варіативності параметрів та характер покриття сценарного простору.

Таблиця 5.8

Статистичні межі та перцентильні характеристики агрегованих показників моделі IDEM

Показник	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5
Мінімальне значення	0,0001	0,0001	0,0003	0,0003	0,0001
Максимальне значення	0,9998	0,9999	0,9999	0,9996	1,0000
Діапазон	0,9998	0,9998	0,9996	0,9994	0,9999
Перцентиль 25%	0,2903	0,2931	0,2946	0,3008	0,3022
Перцентиль 75%	0,6948	0,7017	0,7013	0,7012	0,6987
Перцентиль 95%	0,9263	0,9327	0,9290	0,9311	0,9284

Джерело: розроблено автором.

Аналіз мінімальних значень свідчить про те, що всі агреговані показники моделі охоплюють практично повний нижній діапазон нормалізованого простору. Значення мінімумів знаходяться дуже близько до нуля, що підтверджує наявність у сформованому сценарному просторі сценаріїв із критично низькими рівнями окремих компонентів системи економіко-цифрового управління. Це свідчить про високу репрезентативність сформованого датасету та можливість аналізу поведінки моделі IDEM не лише в умовах стабільного функціонування підприємства, але й у кризових або несприятливих сценаріях.

Максимальні значення всіх агрегованих показників також знаходяться практично на верхній межі нормалізованого діапазону та наближаються до одиниці. Це означає, що сценарний простір включає також варіанти функціонування системи управління з максимально високими рівнями економічної результативності, цифрової зрілості, екологічної ефективності, стейкхолдерної орієнтованості та організаційної стійкості.

Діапазони зміни показників також наближаються до максимально можливого значення одиниці та знаходяться в межах приблизно 0,9994–0,9999. Це свідчить про надзвичайно широкий спектр сформованих сценаріїв та високу варіативність параметрів верхнього рівня моделі. Найбільший діапазон спостерігається для показника Out5, що характеризує організаційно-інноваційну стійкість підприємства. Водночас навіть найменший діапазон для Out4 залишається практично максимальним, що підтверджує рівномірність покриття сценарного простору для всіх компонентів системи управління.

Особливий інтерес становить аналіз перцентильних характеристик, які дозволяють оцінити структуру розподілу результатів моделювання та концентрацію сценаріїв у різних діапазонах значень.

Перцентиль 25% для всіх показників знаходиться приблизно в межах 0,29–0,30. Це означає, що чверть сформованих сценаріїв характеризується значеннями агрегованих показників нижче цього рівня. Водночас значення перцентилів залишаються суттєво вищими за мінімальні межі розподілу, що свідчить про відсутність надмірної концентрації сценаріїв у критично низькій області значень.

Перцентиль 75% знаходиться приблизно в межах 0,69–0,70 для всіх агрегованих показників. Це свідчить про те, що основна маса сценаріїв концентрується у центральній та помірно високій області нормалізованого простору параметрів. Подібна структура розподілу є характерною для збалансованих сценарних просторів, сформованих методом Latin Hypercube Sampling.

Різниця між перцентилями 25% та 75% формує міжквартильний інтервал, який характеризує центральну область розподілу результатів. Для всіх агрегованих показників міжквартильні інтервали мають дуже близькі значення, що свідчить про однорідну структуру варіативності параметрів моделі та відсутність різких дисбалансів між окремими компонентами системи економіко-цифрового управління.

Перцентиль 95% для всіх показників перевищує рівень 0,92, що свідчить про наявність у сценарному просторі значної кількості сценаріїв із високими значеннями агрегованих параметрів. Водночас навіть верхні 5% результатів не демонструють різких стрибків або аномальних відхилень, що може вказувати на стабільний характер сформованого розподілу та відсутність надмірної концентрації екстремальних сценаріїв.

Загалом отримані результати підтверджують, що сформований сценарний простір характеризується високим рівнем репрезентативності та забезпечує ефективне покриття всього діапазону можливих станів системи економіко-цифрового управління підприємством. Це створює належну основу для подальшого аналізу поведінки інтегрального індексу IDEM, оцінювання стійкості моделі та проведення аналіз чутливості в умовах багатофакторної невизначеності.

На рис. 5.9 наведено графічне представлення статистичних меж та перцентильних характеристик агрегованих показників верхнього рівня моделі IDEM, отриманих у результаті сценарного моделювання методом Latin Hypercube Sampling. Для кожного з показників Out1–Out5 відображено мінімальні та максимальні значення, діапазон зміни, а також перцентилі 25%, 75% та 95%.

Отримані результати демонструють високий рівень однорідності структури сформованого сценарного простору. Для всіх агрегованих показників мінімальні значення знаходяться практично на нижній межі нормалізованого діапазону, тоді як максимальні значення наближаються до одиниці. Це підтверджує, що метод Latin Hypercube Sampling забезпечив

ефективне покриття всього простору можливих значень параметрів моделі та дозволив сформувати широкий спектр сценаріїв функціонування системи економіко-цифрового управління.

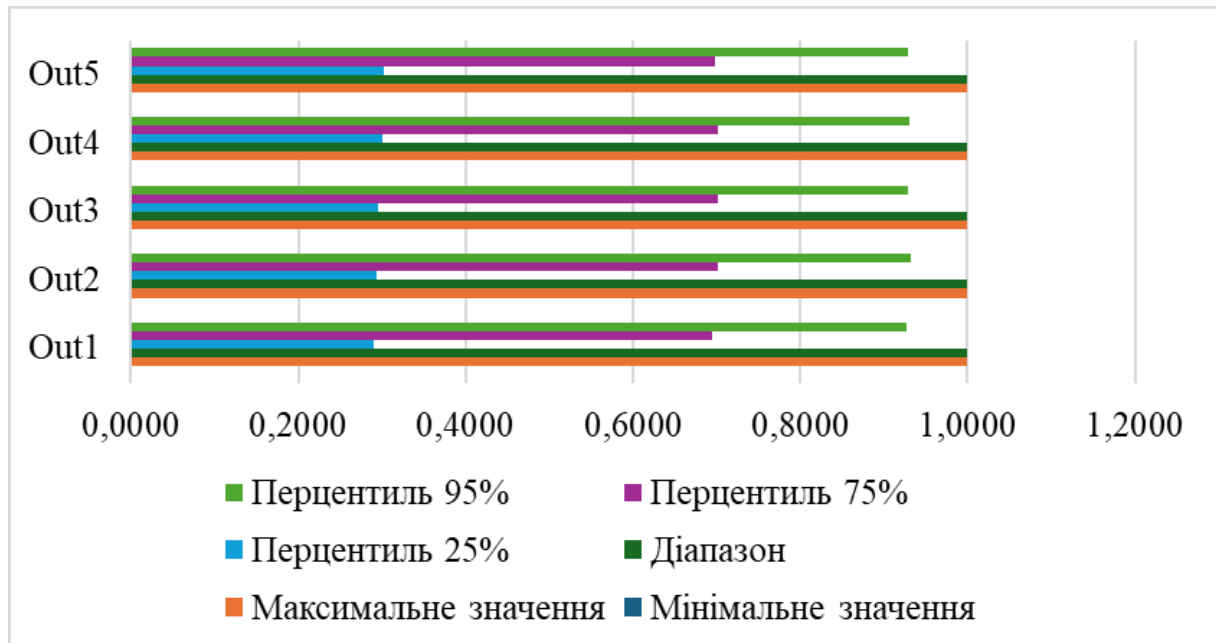


Рис. 5.9. Порівняння статистичних меж та перцентильних характеристик агрегованих показників моделі IDEM

Джерело: розроблено автором.

Діапазони зміни для всіх показників є практично максимальними та залишаються близькими до одиниці. Подібний результат свідчить про високу варіативність сформованого датасету та підтверджує репрезентативність сценарного простору. При цьому відсутність значних відмінностей між діапазонами окремих параметрів вказує на збалансований характер генерації сценаріїв та приблизно однаковий рівень варіативності всіх компонентів моделі IDEM.

Перцентильні характеристики демонструють достатньо подібну структуру розподілу для всіх агрегованих показників. Значення перцентиля 25% знаходяться поблизу рівня 0,30, що свідчить про відсутність надмірної концентрації сценаріїв у нижній області розподілу. Водночас перцентиль 75% для всіх показників наближається до рівня 0,70, що підтверджує концентрацію основної частини сценаріїв у середній та помірно високій області значень.

Графічний аналіз також підтверджує високу збалансованість структури моделі IDEM. Усі агреговані показники характеризуються дуже близькими статистичними межами та подібними перцентильними інтервалами. Це свідчить про відсутність структурного домінування окремих компонентів у процесі формування сценарного простору та підтверджує системний характер моделі економіко-цифрового управління.

З точки зору практичної інтерпретації, отримані результати вказують на те, що модель IDEM здатна функціонувати у широкому спектрі умов – від критично низьких до максимально високих рівнів ефективності окремих компонентів системи управління. Водночас основна частина сценаріїв концентрується у центральній області розподілу, що може свідчити про відносно стабільний характер поведінки моделі та збалансованість інтегрованих параметрів верхнього рівня.

У таблиці 5.9 наведено результати аналізу коефіцієнта варіації, коефіцієнта асиметрії та ексцесу для агрегованих показників верхнього рівня моделі IDEM, отриманих у результаті сценарного моделювання методом Latin Hypercube Sampling. Дані статистичні характеристики дозволяють оцінити рівень варіативності параметрів, форму розподілу результатів та ступінь концентрації значень у межах сформованого сценарного простору.

Аналіз коефіцієнтів варіації свідчить про відносно однорідний рівень мінливості всіх агрегованих показників моделі. Значення коефіцієнта варіації для Out1–Out5 знаходяться в дуже вузькому діапазоні від 1,89 до 1,94, що підтверджує збалансований характер сформованого датасету та відсутність суттєвих диспропорцій між окремими компонентами системи економіко-цифрового управління.

Найнижчі значення коефіцієнта варіації спостерігаються для показників Out1 та Out2, тоді як найвищі – для Out4 та Out5. Це може свідчити про дещо більшу варіативність сценаріїв, пов'язаних зі стейкхолдерно-людиноцентричною орієнтованістю та організаційно-інноваційною стійкістю підприємства. Водночас відмінності між показниками залишаються

незначними, що підтверджує однорідний характер генерації сценаріїв методом Latin Hypercube Sampling.

Таблиця 5.9

Показники варіативності та форми розподілу агрегованих параметрів моделі IDEM

Показник	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5
Коефіцієнт варіації	1,89	1,89	1,90	1,94	1,94
Коефіцієнт асиметрії	0,0507	0,0296	0,0288	-0,0178	-0,0184
Ексцес	-0,957	-1,0048	-0,9739	-0,9388	-0,938

Джерело: розроблено автором.

Отримані значення коефіцієнтів варіації також свідчать про високий рівень чутливості моделі до зміни параметрів сценарного простору. Оскільки інтегровані показники охоплюють практично весь нормалізований діапазон значень, сформований сценарний простір характеризується значною різноманітністю можливих станів системи управління. Це створює належні умови для подальшого аналізу чутливості та оцінювання стійкості інтегрального індексу IDEM.

Коефіцієнти асиметрії для всіх агрегованих показників знаходяться дуже близько до нуля. Для Out1–Out3 спостерігається незначна додатна асиметрія, тоді як для Out4 та Out5 – слабка від’ємна асиметрія. Подібний результат свідчить про достатньо симетричний характер розподілу сценаріїв та відсутність критичного зміщення результатів у бік надмірно високих або надмірно низьких значень. Незначна додатна асиметрія для Out1–Out3 може вказувати на наявність окремих сценаріїв із підвищеними значеннями економічної результативності, цифрової зрілості та екологічної ефективності. Водночас слабка від’ємна асиметрія для Out4 та Out5 свідчить про дещо більшу концентрацію сценаріїв у верхній області значень відповідних параметрів. Однак абсолютні значення коефіцієнтів асиметрії залишаються

дуже малими, тому загалом розподіл можна вважати близьким до симетричного.

Подібна структура розподілу є позитивною характеристикою сформованого сценарного простору, оскільки підтверджує відсутність систематичного зміщення вибірки та достатньо рівномірне покриття простору параметрів. Для моделей, побудованих на основі Latin Hypercube Sampling, це є важливим показником якості генерації сценаріїв та репрезентативності отриманих результатів.

Значення ексцесу для всіх агрегованих показників є від'ємними та перебувають приблизно в межах від $-0,94$ до $-1,00$. Це свідчить про те, що розподіл результатів є більш пласким порівняно з нормальним законом розподілу. Подібний характер розподілу означає, що значення сценаріїв більш рівномірно розподілені по всьому діапазону, а концентрація результатів навколо середнього значення є менш вираженою.

Для задач імітаційного моделювання така форма розподілу є очікуваною та позитивною характеристикою сценарного простору. Від'ємний ексцес підтверджує, що сформований датасет не концентрується лише в центральній області значень, а забезпечує достатньо рівномірне покриття всього простору параметрів. Це особливо важливо для подальшого аналізу чутливості моделі IDEM та оцінювання поведінки інтегрального індексу в умовах багатфакторної невизначеності.

Крім того, відсутність високих додатних значень ексцесу свідчить про відсутність надмірної кількості екстремальних сценаріїв або різких нелінійних стрибків у поведінці агрегованих показників. Це може вказувати на достатньо стабільний характер роботи верхнього рівня нечітко-логічної системи та збалансованість структури бази правил Mamdani.

На рис. 5.10 наведено порівняльний аналіз коефіцієнтів варіації, асиметрії та ексцесу для агрегованих показників верхнього рівня моделі IDEM, отриманих у результаті сценарного моделювання методом Latin Hypercube Sampling. Представлені статистичні характеристики дозволяють

оцінити рівень варіативності параметрів, форму розподілу сценаріїв та ступінь концентрації результатів у межах сформованого сценарного простору.

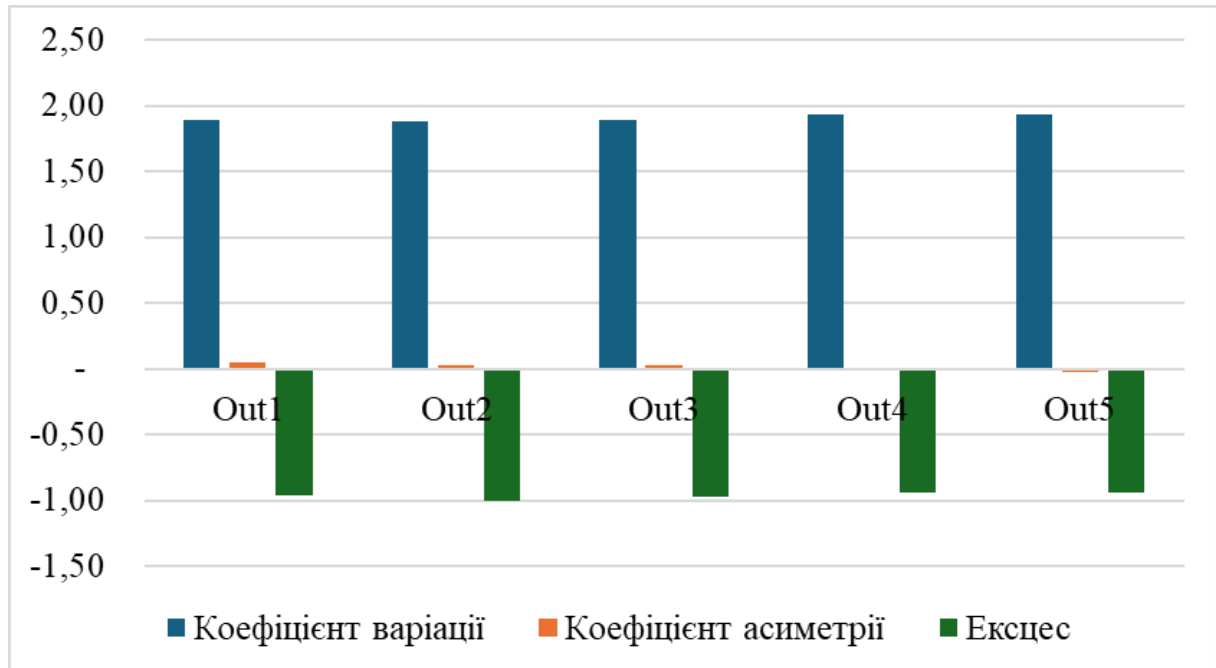


Рис. 5.10. Порівняння коефіцієнтів варіації, асиметрії та експесу агрегованих показників моделі IDEM

Джерело: розроблено автором.

Отримані результати свідчать про високий рівень однорідності поведінки всіх агрегованих показників моделі. Значення коефіцієнтів варіації для Out1–Out5 знаходяться практично на однаковому рівні та змінюються в межах приблизно 1,89–1,94. Це підтверджує збалансований характер сценарного простору та відсутність суттєвих диспропорцій між окремими компонентами системи економіко-цифрового управління.

Найвищі значення коефіцієнта варіації спостерігаються для Out4 та Out5, що може свідчити про дещо більшу чутливість стейкхолдерно-людиноцентричної та організаційно-інноваційної складових до зміни сценарних параметрів. Водночас різниця між показниками є незначною, тому загалом усі компоненти моделі характеризуються близьким рівнем варіативності.

Коефіцієнти асиметрії для всіх показників знаходяться дуже близько до нуля, що свідчить про майже симетричний характер розподілу результатів моделювання. Для Out1–Out3 спостерігається слабка додатна асиметрія, тоді як для Out4 та Out5 – незначна від’ємна асиметрія. Однак абсолютні значення коефіцієнтів асиметрії залишаються мінімальними, тому сформований сценарний простір можна вважати достатньо збалансованим без вираженого зміщення в бік високих або низьких значень.

Подібна структура розподілу є характерною для якісно сформованих сценарних вибірок на основі Latin Hypercube Sampling, оскільки даний метод забезпечує рівномірне покриття простору параметрів та мінімізує ризик надмірної концентрації сценаріїв у окремих областях розподілу.

Для задач імітаційного моделювання та аналізу чутливості така характеристика є позитивною, оскільки підтверджує репрезентативність сформованого датасету та ефективність покриття багатовимірного простору параметрів. Відсутність високого додатного ексцесу також свідчить про відсутність значної кількості екстремальних сценаріїв або різких нелінійних стрибків у поведінці агрегованих показників верхнього рівня моделі IDEM.

Графічний аналіз підтверджує, що всі компоненти системи економіко-цифрового управління характеризуються близькими статистичними властивостями та демонструють достатньо стабільну поведінку в межах сформованого сценарного простору. Це може свідчити про збалансований характер структури моделі IDEM та ефективну інтеграцію економічних, цифрових, екологічних, стейкхолдерних та організаційних компонентів у межах єдиної нечітко-логічної системи.

У таблиці 5.10 наведено результати оцінювання довірчих інтервалів середніх значень агрегованих показників верхнього рівня моделі IDEM, отриманих у результаті сценарного моделювання методом Latin Hypercube Sampling. Представлені характеристики дозволяють оцінити статистичну надійність сформованих середніх значень, рівень стабільності результатів моделювання та точність оцінювання параметрів сценарного простору.

Довірчі інтервали та похибки середніх значень агрегованих показників моделі IDEM

Показник	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5
Середнє значення	0,4905	0,4958	0,4945	0,5021	0,5008
Довірчий інтервал середнього 95% (-)	0,4817	0,486	0,4847	0,4924	0,4911
Довірчий інтервал середнього 95% (+)	0,4993	0,5057	0,5043	0,5118	0,5104
Верхня похибка	0,0088	0,0099	0,0098	0,0097	0,0096
Нижня похибка	0,0088	0,0098	0,0098	0,0097	0,0097

Джерело: розроблено автором.

Аналіз середніх значень підтверджує збалансований характер сформованого датасету. Для всіх агрегованих показників середні значення знаходяться поблизу центральної області нормалізованого діапазону та змінюються в межах приблизно від 0,4905 до 0,5021. Це свідчить про відсутність структурного зміщення сценарного простору в бік надмірно низьких або надмірно високих значень окремих компонентів системи економіко-цифрового управління.

Розраховані 95% довірчі інтервали демонструють дуже вузькі межі для всіх агрегованих показників моделі. Нижні межі довірчих інтервалів знаходяться приблизно в межах 0,4817–0,4924, тоді як верхні межі – в межах 0,4993–0,5118. Подібна структура інтервалів свідчить про високий рівень статистичної стабільності сформованих результатів та підтверджує репрезентативність отриманого сценарного простору.

Особливістю отриманих результатів є дуже незначна ширина довірчих інтервалів. Для всіх показників межі інтервалу відхиляються від середнього значення менш ніж на 0,01. Це свідчить про високу точність оцінювання середніх значень та достатню однорідність сформованого набору сценаріїв.

Найширший довірчий інтервал спостерігається для показника Out2, що характеризує цифрову зрілість управління. Це може вказувати на дещо більшу варіативність цифрових характеристик у межах сценарного простору.

Водночас навіть для цього показника ширина довірчого інтервалу залишається незначною, що підтверджує загальну стабільність результатів моделювання.

Показники верхньої та нижньої похибки також мають дуже близькі значення для всіх агрегованих параметрів. Для більшості показників величина похибки знаходиться приблизно в межах 0,0088–0,0099. Подібна симетричність похибок свідчить про близький до симетричного характеру розподілу сценаріїв та відсутність значного структурного перекосу результатів.

Майже однакові значення верхньої та нижньої похибки підтверджують, що сформований сценарний простір характеризується достатньо рівномірним розподілом результатів навколо середнього значення. Для моделей, побудованих на основі Latin Hypercube Sampling, це є важливим підтвердженням якості генерації сценаріїв та репрезентативності сформованого датасету.

З точки зору практичної інтерпретації, отримані результати свідчать про високу стійкість агрегованих компонентів моделі IDEM. Навіть при значній кількості сценаріїв та широкому покритті простору параметрів середні значення показників залишаються стабільними, а рівень статистичної невизначеності є незначним. Загалом результати аналізу довірчих інтервалів та похибок підтверджують високу статистичну надійність сформованого сценарного простору, репрезентативність датасету та придатність моделі IDEM до подальшого аналізу інтегрального індексу, аналіз чутливості та оцінювання стійкості системи економіко-цифрового управління будівельними підприємствами.

У таблиці 5.11 наведено результати кореляційного аналізу взаємозв'язку між агрегованими показниками верхнього рівня моделі та інтегральним індексом IDEM. Отримані коефіцієнти кореляції дозволяють оцінити ступінь впливу окремих компонентів системи економіко-цифрового управління на формування фінального інтегрального показника.

Результати аналізу свідчать про те, що всі агреговані показники моделі демонструють позитивний кореляційний зв'язок з інтегральним індексом IDEM. Це означає, що зростання значень кожного з компонентів Out1–Out5 сприяє підвищенню загального рівня ефективності економіко-цифрового управління будівельним підприємством.

Таблиця 5.11

**Кореляційний вплив агрегованих показників Out1–Out5 на
інтегральний індекс IDEM**

Out1 – економічна результативність підприємства	0,3271
Out2 – цифрова зрілість управління	0,4687
Out3 – екологічна та біосферосумісна ефективність	0,3672
Out4 – стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість	0,2457
Out5 – організаційно-інноваційна стійкість.	0,1318

Джерело: розроблено автором.

Найвищий рівень кореляційного впливу спостерігається для показника Out2, який характеризує цифрову зрілість управління. Значення коефіцієнта кореляції становить 0,4687, що свідчить про найбільший внесок цифрових компонентів у формуванні інтегрального індексу IDEM. Отриманий результат підтверджує ключову роль цифрової трансформації, автоматизації управлінських процесів та розвитку систем управління даними у забезпеченні ефективності сучасних будівельних підприємств.

Другим за рівнем впливу є показник Out3 – екологічна та біосферосумісна ефективність, для якого коефіцієнт кореляції становить 0,3672. Це свідчить про суттєве значення екологічних та ресурсоефективних характеристик у структурі системи економіко-цифрового управління. Отримані результати підтверджують, що в умовах сучасного розвитку будівельної галузі екологічна складова поступово стає одним із важливих факторів формування загальної ефективності підприємства.

Показник Out1 – економічна результативність підприємства – також демонструє достатньо високий рівень впливу на інтегральний індекс IDEM. Значення коефіцієнта кореляції 0,3271 свідчить про важливу роль фінансової стійкості, рентабельності та інвестиційної привабливості у структурі економіко-цифрового управління. Водночас рівень впливу економічної складової виявився нижчим порівняно з цифровою та екологічною компонентами, що може свідчити про комплексний характер сучасних систем управління, де економічна ефективність вже не є єдиним визначальним фактором.

Для показника Out4 – стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості – отримано помірний рівень кореляційного впливу на інтегральний індекс IDEM. Значення коефіцієнта кореляції 0,2457 свідчить про те, що соціальні, комунікаційні та людиноцентричні аспекти управління мають позитивний, але менш виражений вплив на загальну ефективність системи. Це може бути пов'язано з тим, що дані фактори частіше виступають як підтримувальні або стабілізуючі компоненти системи управління, а не як безпосередні драйвери інтегрального індексу.

Найнижчий рівень кореляційного впливу спостерігається для показника Out5 – організаційно-інноваційної стійкості. Значення коефіцієнта кореляції становить 0,1318, що свідчить про відносно слабкий прямий статистичний зв'язок із інтегральним індексом IDEM. Водночас це не означає низької важливості організаційно-інноваційної складової. У нечітко-логічних системах окремі компоненти можуть впливати на результат не лінійно, а через складні комбінації нечітких правил та взаємодію з іншими параметрами моделі. Отримані результати аналізу чутливості свідчать про те, що найбільш критичними факторами формування інтегрального індексу IDEM у межах сформованого сценарного простору є цифрова зрілість управління та екологічна ефективність підприємства. Це підтверджує актуальні тенденції розвитку будівельної галузі, у яких цифровізація та біосферосумісний

розвиток стають ключовими напрямками підвищення конкурентоспроможності підприємств.

З точки зору практичної інтерпретації результати кореляційного аналізу дозволяють визначити пріоритетні напрями управлінського впливу. Насамперед це стосується необхідності розвитку цифрових систем управління, автоматизації процесів, інтеграції цифрових платформ та підвищення рівня екологічної ефективності підприємства. Саме ці компоненти демонструють найбільший потенціал впливу на загальну ефективність системи економіко-цифрового управління.

Загалом результати аналізу підтверджують багатфакторний характер моделі IDEM та свідчать про те, що інтегральний індекс формується внаслідок комплексної взаємодії економічних, цифрових, екологічних, соціальних та організаційних компонентів системи управління будівельним підприємством.

На рис. 5.11 представлено теплову карту кореляційних залежностей між агрегованими показниками верхнього рівня моделі IDEM, сформованими у процесі сценарного моделювання методом Latin Hypercube Sampling. Матриця кореляцій дозволяє оцінити ступінь статистичного взаємозв'язку між компонентами системи економіко-цифрового управління та визначити рівень їх структурної незалежності у межах сформованого сценарного простору.

Отримані результати свідчать про дуже низький рівень кореляційних залежностей між усіма агрегованими показниками моделі. Значення коефіцієнтів кореляції для більшості пар параметрів знаходяться поблизу нуля та не перевищують за абсолютним значенням приблизно 0,05. Це свідчить про відсутність виражених лінійних взаємозалежностей між окремими компонентами системи управління. Низький рівень взаємної кореляції між показниками Out1–Out5 означає, що агреговані параметри були сформовані достатньо незалежно один від одного, без штучного структурного зміщення або домінування окремих груп сценаріїв.

Найвищий позитивний коефіцієнт кореляції спостерігається між показниками Out2 та Out3 і становить приблизно 0,0319. Це може свідчити про

слабкий зв'язок між цифровою зрілістю управління та екологічною ефективністю підприємства. Подібний результат є логічним з точки зору сучасних тенденцій розвитку будівельної галузі, де цифровізація часто супроводжується впровадженням більш ефективних систем управління ресурсами та екологічного моніторингу. Однак величина коефіцієнта залишається дуже низькою, тому даний взаємозв'язок не має вираженого характеру.

	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5
Out1	1	-0,0115	0,0185	0,0228	-0,0449
Out2	-0,0115	1	0,0319	0,0224	-0,0130
Out3	0,0185	-0,0242	1	0,0213	-0,0244
Out4	0,0228	0,0105	0,0286	1	0,0008
Out5	-0,0449	-0,0399	-0,0259	0,0008	1

Рис. 5.11. Теплова карта кореляційних залежностей між агрегованими показниками моделі IDEM

Джерело: розроблено автором.

Незначні позитивні кореляції також спостерігаються між іншими компонентами моделі, зокрема між Out1 та Out4, Out3 та Out4, а також між Out2 та Out4. Це може свідчити про певну узгодженість окремих складових

системи економіко-цифрового управління. Водночас абсолютні значення коефіцієнтів залишаються мінімальними, що підтверджує загальну структурну незалежність агрегованих параметрів.

Для окремих пар показників спостерігаються слабкі від'ємні кореляції. Найбільше від'ємне значення отримано між Out1 та Out5 і становить $-0,0449$. Подібний результат може вказувати на наявність окремих сценаріїв, у яких підвищення економічної результативності супроводжується незначним зниженням організаційно-інноваційної стійкості. Однак абсолютне значення кореляції є дуже малим, тому подібний ефект не має суттєвого впливу на загальну структуру моделі.

Загалом матриця кореляцій підтверджує відсутність мультиколінеарності між агрегованими показниками верхнього рівня моделі IDEM. Це є важливою характеристикою сформованого датасету, оскільки надмірно високі кореляції між параметрами могли б свідчити про дублювання інформації або структурну залежність окремих компонентів системи управління.

Для задач аналізу чутливості та сценарного моделювання низький рівень взаємної кореляції між Out1–Out5 є позитивною характеристикою, оскільки дозволяє більш об'єктивно оцінювати вплив кожного окремого компонента на інтегральний індекс IDEM. У таких умовах результати аналізу чутливості не спотворюються прихованими статистичними залежностями між параметрами моделі.

З точки зору практичної інтерпретації, отримані результати свідчать про те, що економічні, цифрові, екологічні, стейкхолдерні та організаційно-інноваційні складові системи управління у межах сформованого сценарного простору функціонують як відносно автономні компоненти. Це підтверджує багатофакторний характер моделі IDEM та створює передумови для більш коректного аналізу впливу окремих компонентів на інтегральний індекс економіко-цифрового управління будівельними підприємствами.

5.3. Формування нейромережевої моделі прогнозування IDEM у системі підтримки управлінських рішень

Особливу складність становить інтегральне оцінювання ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами, яке передбачає врахування широкого спектра показників: від економічних і фінансових до цифрових, екологічних, соціальних та організаційних. Взаємозв'язки між цими показниками є нелінійними, часто нечітко визначеними та можуть змінюватися залежно від конкретного управлінського контексту. Це обумовлює необхідність використання інтелектуальних методів моделювання, здатних працювати в умовах неповноти інформації та складної структури взаємозалежностей.

Подальшим етапом дослідження стало розширення функціональних можливостей запропонованої моделі шляхом інтеграції методів штучного інтелекту. Зокрема, у розділі 4.3 було запропоновано архітектуру та розроблено штучну нейронну мережу, яка апроксимує поведінку нечіткої логічної моделі IDEM та забезпечує швидке прогнозування інтегрального індексу [165].

Разом із тим, практична цінність будь-якої моделі визначається не лише її теоретичною обґрунтованістю, а й можливістю застосування у реальних умовах функціонування підприємств. Саме тому наступним логічним етапом дослідження є апробація розробленого підходу, інтерпретація отриманих результатів та формування практичних рекомендацій для систем економіко-цифрового управління будівельними підприємствами.

З позиції систем підтримки прийняття рішень особливо важливим є забезпечення інтерпретованості результатів моделювання. Незважаючи на високу точність нейромережевих моделей, їх використання у практиці управління потребує чіткого розуміння причинно-наслідкових зв'язків між вхідними параметрами та вихідними показниками. У цьому контексті поєднання Fuzzy Logic та ANN є методологічно виправданим, оскільки нечітка

логіка забезпечує прозорість і зрозумілість моделі, тоді як нейронна мережа – ефективність обчислень та здатність до узагальнення.

У межах даного дослідження для визначення найбільш ефективної конфігурації штучної нейронної мережі було проведено серію експериментів із різними комбінаціями функцій активації та алгоритмів оптимізації. Такий підхід дозволяє об'єктивно оцінити вплив ключових гіперпараметрів на якість навчання моделі, її збіжність та здатність до узагальнення. Враховуючи, що нейронна мережа використовується для апроксимації результатів нечіткої логічної моделі IDEM, правильний вибір цих параметрів є критично важливим для забезпечення високої точності прогнозування.

У процесі дослідження було протестовано шість варіантів нейронної мережі, які відрізнялися між собою типом функції активації у прихованих шарах та вибором оптимізатора. Зокрема, розглядалися дві найбільш поширені функції активації ReLU та tanh, а також три алгоритми оптимізації – SGD, RMSprop та Adam.

Перша група моделей M1–M3 використовує функцію активації ReLU (Rectified Linear Unit) у прихованих шарах. Основною перевагою ReLU є простота обчислення та відсутність насичення для додатних значень, що значно покращує передачу градієнта у глибоких мережах. Це забезпечує швидше навчання та кращу збіжність моделі. У межах цієї групи також варіюється оптимізатор: M1 використовує SGD, M2 – RMSprop, а M3 – Adam.

Практика показує, що комбінація ReLU з сучасними адаптивними оптимізаторами, зокрема Adam, часто забезпечує найкращі результати у задачах регресії на табличних даних. Це пояснюється тим, що ReLU дозволяє ефективно моделювати нелінійні залежності, а Adam забезпечує стабільну та швидку оптимізацію вагових коефіцієнтів.

Друга група моделей M4–M6 базується на використанні функції активації гіперболічного тангенса. Функція tanh задає значення в діапазоні $(-1;1)$ і є симетричною відносно нуля. Це дозволяє краще центровано передавати сигнали у мережі, що може позитивно впливати на процес

навчання. У межах моделей M4–M6 також варіюються оптимізатори: M4 – SGD, M5 – RMSprop, M6 – Adam. Таким чином, ця група дозволяє оцінити, наскільки використання симетричної функції активації впливає на якість апроксимації інтегрального індексу IDEM.

Щодо оптимізаторів, то їх роль у процесі навчання ANN є визначальною. Найпростішим із розглянутих є SGD, який реалізує базову ідею градієнтного спуску. Такий підхід дозволяє стабілізувати процес навчання та прискорити збіжність. Найбільш складним і водночас ефективним є оптимізатор Adam, який забезпечує швидку збіжність та стійкість до вибору гіперпараметрів, що робить його одним із найбільш універсальних оптимізаторів.

Загалом, тестування моделей M1–M6 дозволяє комплексно оцінити вплив як функції активації, так і алгоритму оптимізації на якість нейромережевого прогнозування інтегрального індексу IDEM. Такий підхід є методологічно обґрунтованим, оскільки не передбачає апіорного вибору “найкращої” конфігурації, а базується на експериментальному порівнянні альтернативних варіантів.

Рисунки 5.12а та 5.12б показують порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) навчальних та валідаційних вибірок моделі M1.

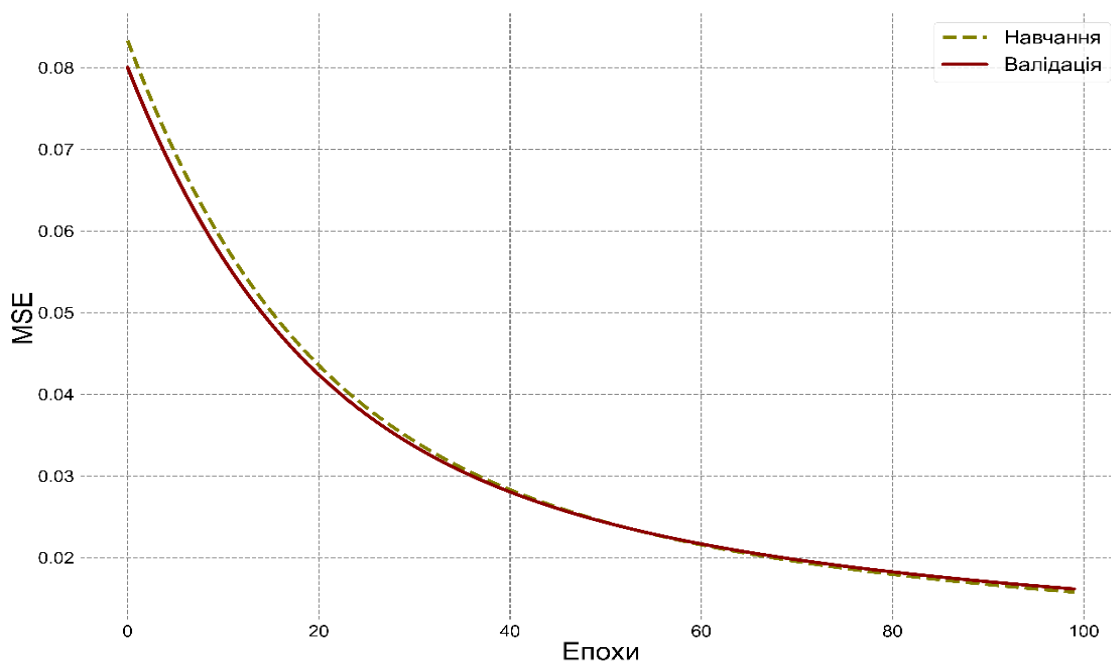
Представлені у таблиці 5.12 результати відображають динаміку зміни основних метрик помилки нейронної мережі у процесі навчання та валідації для задачі прогнозування інтегрального індексу IDEM.

Таблиця 5.12

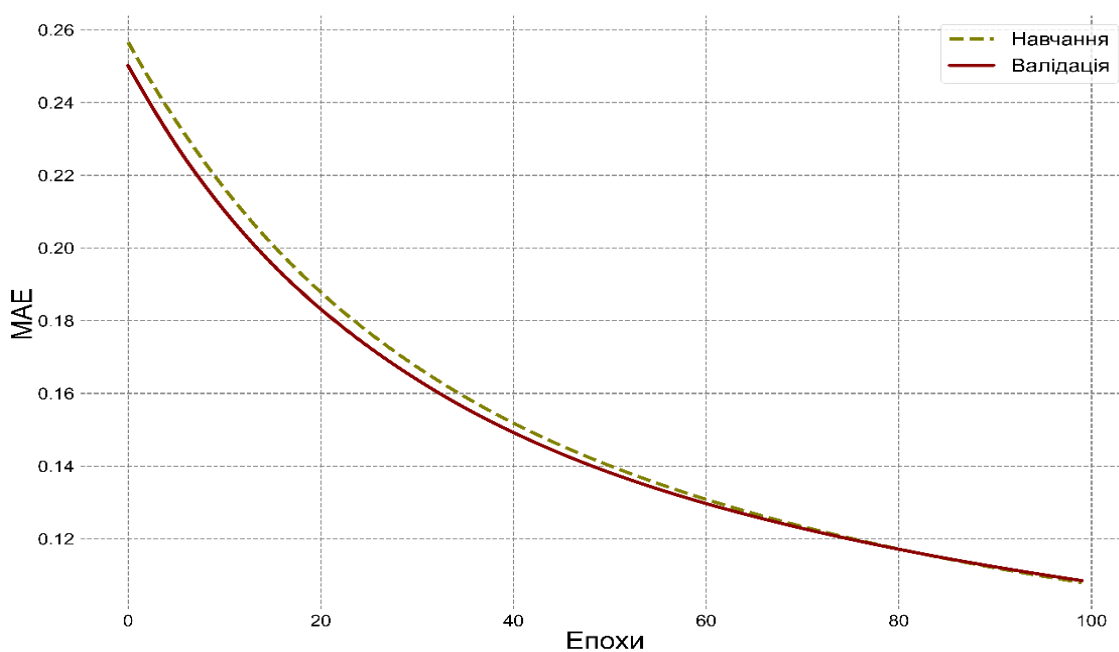
**Динаміка зміни показників помилки у процесі навчання та валідації
моделі M1**

Метрика	MSE (max)	MSE (min)	MAE (max)	MAE (min)
Навчальна вибірка	0,0923	0,0182	0,2757	0,1126
Валідаційна вибірка	0,0805	0,0187	0,2539	0,1151

Джерело: розроблено автором.



(а)



(б)

Рис. 5.12. Порівняння метрик MSE та MAE навчальних та валідаційних вибірок моделі M1

Джерело: розроблено автором.

Зокрема, наведено максимальні та мінімальні значення середньоквадратичної помилки (MSE) та середньої абсолютної помилки (MAE), що дозволяє оцінити як початковий стан моделі, так і її фінальну точність після завершення навчання.

Аналіз максимальних значень показує, що на початкових етапах навчання ANN характеризується відносно високим рівнем помилки. Для навчальної вибірки значення MSE становить 0,0923, а MAE – 0,2757, тоді як для валідаційної вибірки ці показники дорівнюють 0,0805 та 0,2539 відповідно. Це є очікуваним результатом, оскільки на першому етапі вагові коефіцієнти нейронної мережі ініціалізуються випадковим чином, і модель ще не здатна адекватно відтворювати залежності між вхідними параметрами та інтегральним індексом IDEM.

У процесі навчання спостерігається суттєве зниження значень обох метрик, що свідчить про ефективність процедури оптимізації. Мінімальні значення MSE для навчальної та валідаційної вибірок становлять відповідно 0,0182 та 0,0187, що свідчить про досягнення високої точності апроксимації. Важливо підкреслити, що значення MSE для обох вибірок є практично однаковими, що вказує на відсутність значного розриву між результатами.

Аналогічна тенденція спостерігається і для показника MAE. Мінімальне значення для навчальної вибірки становить 0,1126, а для валідаційної – 0,1151. Різниця між цими значеннями є незначною, що свідчить про хорошу узгодженість моделі та її здатність до узагальнення. Фактично ANN не лише добре навчається на навчальному датасеті, а й демонструє стабільну якість прогнозування на незалежних даних.

Порівняння максимальних і мінімальних значень дозволяє оцінити ступінь покращення моделі у процесі навчання. Зокрема, для навчальної вибірки значення MSE зменшується приблизно у 5 разів (з 0,0923 до 0,0182), а MAE – більш ніж у 2 рази. Для валідаційної вибірки спостерігається аналогічна динаміка: MSE зменшується більш ніж у 4 рази, а MAE – приблизно у 2 рази. Така динаміка свідчить про ефективне навчання нейронної мережі та її здатність поступово мінімізувати помилку прогнозування.

На рис. 5.13 представлено діаграму розсіювання, яка відображає співвідношення між фактичними значеннями інтегрального індексу IDEM та значеннями, прогнозованими штучною нейронною мережею ANN.

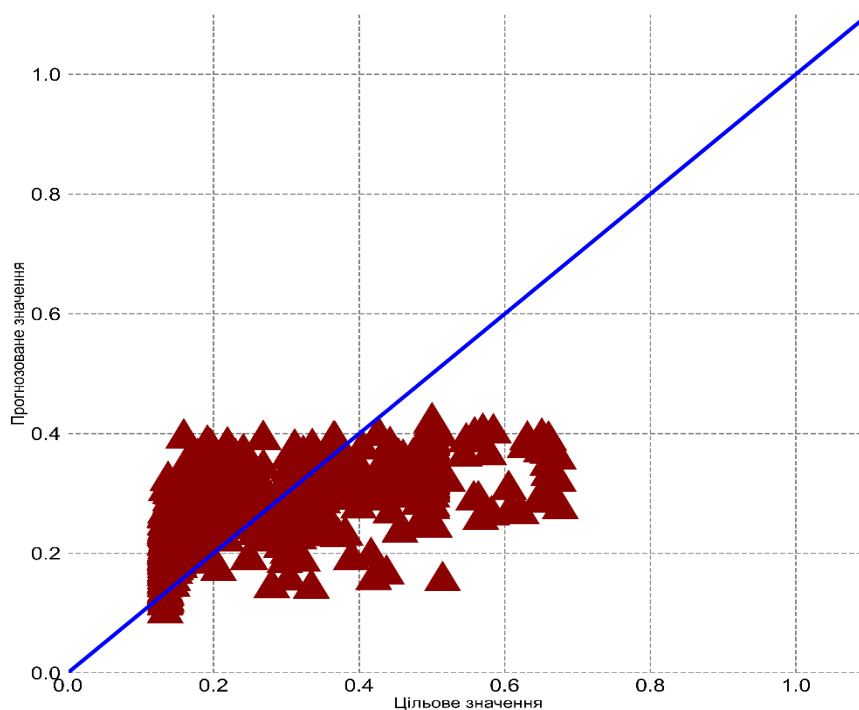


Рис. 5.13. Порівняння фактичних та прогнозованих значень інтегрального індексу IDEM (M1)

Джерело: розроблено автором.

Аналіз графіка показує, що точки розсіювання не концентруються вздовж ідеальної лінії, а формують досить широкий горизонтально витягнутий кластер. Це свідчить про те, що нейронна мережа має обмежену здатність точно відтворювати варіативність інтегрального індексу IDEM у повному діапазоні значень.

Зокрема, спостерігається характерна особливість: незалежно від зростання фактичних значень IDEM (в діапазоні від 0,15 до 0,65), прогнозовані значення ANN залишаються в обмеженому інтервалі приблизно від 0,15 до 0,45. Це означає, що модель має тенденцію до «стиснення» результатів і недооцінювання високих значень індексу, а також часткового переоцінювання низьких значень. Така поведінка моделі свідчить про недостатню чутливість ANN до змін у вхідних параметрах у крайніх діапазонах. Іншими словами, нейронна мережа не повною мірою відтворює нелінійну структуру залежностей, закладену у нечітко-логічній моделі. Крім того, значна відстань точок від лінії $y=x$ вказує на наявність систематичної похибки прогнозування.

У випадку ідеальної моделі всі точки повинні були б розташовуватися вздовж цієї лінії, що означало б точне співпадіння прогнозованих і фактичних значень.

Разом із тим, слід зазначити, що модель все ж відображає загальну тенденцію залежності між змінними: із зростанням фактичного значення IDEM спостерігається певне зростання прогнозованого значення. Це означає, що ANN частково вловлює структуру залежностей, проте робить це з недостатньою точністю.

З практичної точки зору, отримані результати свідчать про те, що поточна конфігурація нейронної мережі потребує подальшого вдосконалення.

На рис. 5.14 представлено гістограму розподілу помилок прогнозування інтегрального індексу IDEM, отриманих за допомогою штучної нейронної мережі. По осі абсцис відкладено значення абсолютної помилки, тоді як по осі ординат – кількість спостережень (частота), що відповідають відповідному інтервалу помилки.

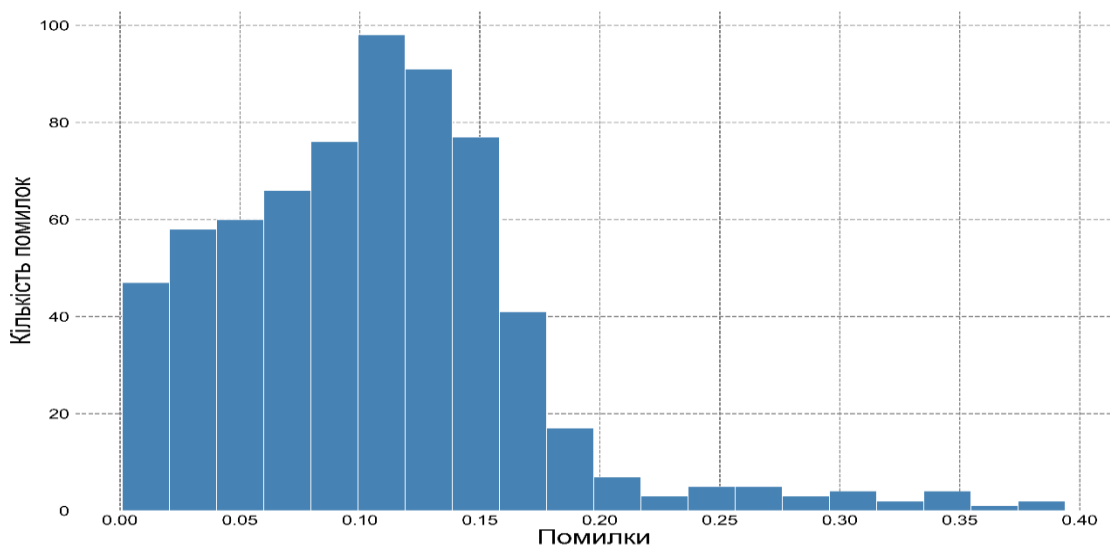


Рис. 5.14. Розподіл помилок прогнозування нейронної мережі M1

Джерело: розроблено автором.

Аналіз гістограми показує, що основна маса помилок зосереджена у відносно вузькому діапазоні приблизно від 0,05 до 0,15. Найбільша щільність розподілу припадає на інтервал близько 0,10–0,12, що свідчить про те, що для більшості сценаріїв нейронна мережа забезпечує помірну точність

прогнозування. Це узгоджується з отриманими раніше значеннями MAE, які також знаходяться на рівні близько 0,11.

Розподіл має асиметричний характер із правостороннім “хвостом”, що означає наявність окремих випадків із відносно великими помилками. Такі значення досягають приблизно 0,30–0,38, проте їх частка є незначною. Це свідчить про те, що, хоча модель у більшості випадків працює стабільно, існують окремі сценарії, у яких ANN не здатна точно відтворити значення інтегрального індексу IDEM.

Водночас важливо відзначити, що помилки, близькі до нуля (менше 0,02–0,03), зустрічаються відносно рідко. Це означає, що модель не досягає дуже високої точності прогнозування для значної частини спостережень, а працює у режимі стабільної, але помірної апроксимації. Така поведінка є типовою для нейронних мереж, які апроксимують складні інтегральні залежності.

На рис. 5.15 представлено теплову карту кореляції між агрегованими показниками верхнього рівня моделі (Out1–Out5) та інтегральним індексом IDEM.

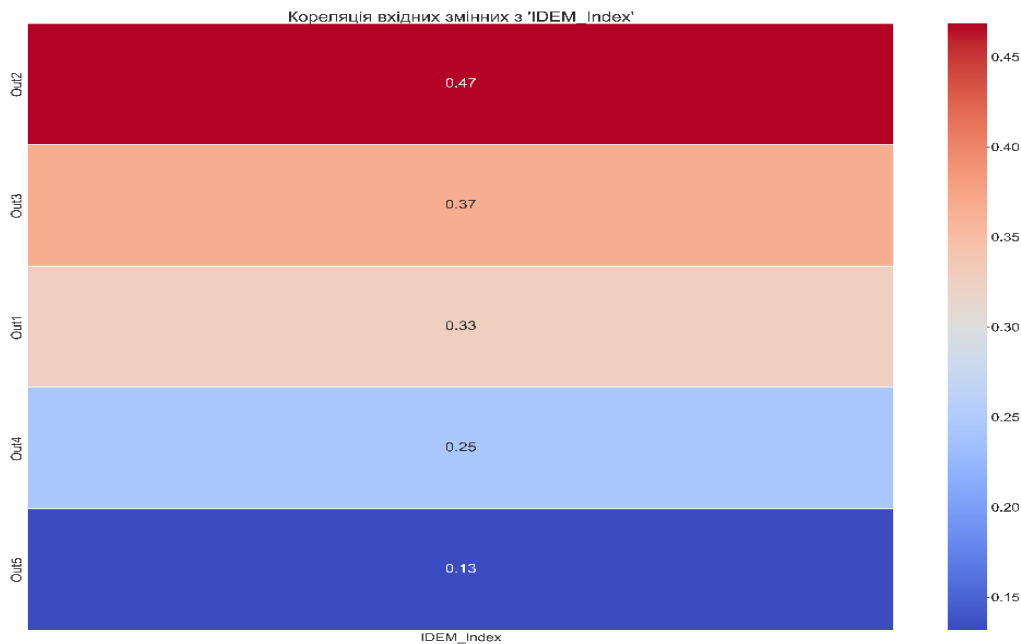


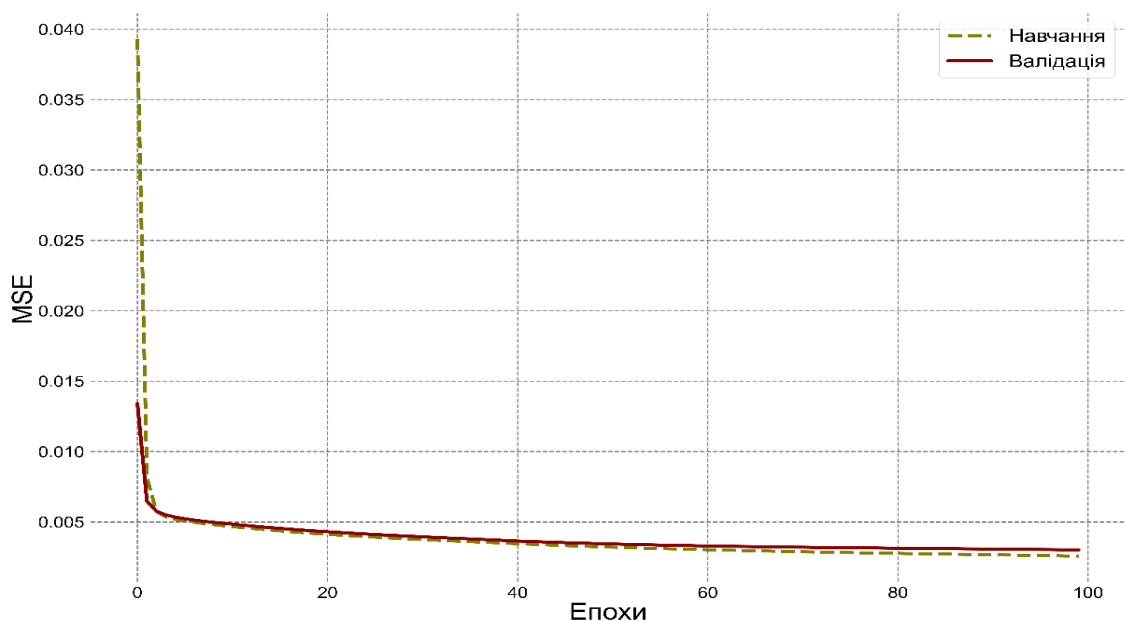
Рис. 5.15. Вплив агрегованих факторів Out1–Out5 на інтегральний індекс IDEM

Джерело: розроблено автором.

Кореляційний аналіз засвідчив неоднакову щільність зв'язку складових Out1–Out5 з інтегральним індексом IDEM. Найвище значення отримано для Out2 – цифрової зрілості управління (0,47), далі – Out3, екологічної та біосферосумісної ефективності (0,37), Out1, економічної результативності (0,33), Out4, стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості (0,25), та Out5, організаційно-інноваційної стійкості (0,13). Усі коефіцієнти є додатними, що підтверджує узгоджений характер зв'язку функціональних складових з IDEM, водночас нижче значення Out5 може відображати опосередкований характер його прояву через взаємодію з іншими компонентами.

Таким чином, результати, представлені на рисунку, підтверджують, що у сучасних умовах найбільший вплив на ефективність управління мають саме цифрові та екологічні фактори, тоді як традиційні економічні показники відіграють важливу, але вже не домінуючу роль. Це підкреслює необхідність переорієнтації управлінських стратегій будівельних підприємств на цифровізацію та сталий розвиток.

Рисунки 5.16а та 5.16б показують порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) навчальних та валідаційних вибірок моделі M2.



(a)

На початковому етапі навчання модель демонструє відносно високі значення помилки: для навчальної вибірки MSE становить 0,0393, а MAE – 0,1708. Для валідаційної вибірки ці показники є суттєво нижчими (0,0134 та 0,0996 відповідно), що може свідчити про випадкову ініціалізацію ваг та специфіку першої ітерації навчання.

У процесі навчання спостерігається різке зниження значень помилок. Мінімальні значення MSE досягають 0,0026 для навчальної вибірки та 0,0030 для валідаційної. Це свідчить про дуже високу точність апроксимації залежності між вхідними параметрами та інтегральним індексом IDEM.

Аналогічна тенденція спостерігається і для показника MAE: мінімальні значення становлять 0,0350 для навчальної вибірки та 0,0384 для валідаційної. Таким чином, середня абсолютна помилка прогнозування не перевищує 0,04, що відповідає приблизно 3–4 % шкали індексу IDEM [0;1].

Порівняльний аналіз показує, що:

- MSE зменшується приблизно у 15 разів для навчальної вибірки;
- MSE зменшується більш ніж у 4 рази для валідаційної вибірки;
- MAE зменшується приблизно у 5 разів.

Це свідчить про дуже ефективний процес навчання нейронної мережі та високу швидкість збіжності моделі.

Особливо важливим є той факт, що мінімальні значення помилки для навчальної та валідаційної вибірок є близькими (різниця для MSE становить лише 0,0004, а для MAE – близько 0,0034). Це підтверджує відсутність перенавчання та високу узагальнюючу здатність моделі.

З практичної точки зору отримані результати можна оцінити як дуже високі. Рівень помилки на рівні 0,03–0,04 означає, що нейронна мережа майже точно відтворює поведінку нечітко-логічної моделі IDEM. Це дозволяє використовувати ANN як ефективний інструмент швидкого прогнозування інтегрального індексу без необхідності повторного виконання повної процедури нечіткого виведення.

На рис. 5.17 представлено діаграму розсіювання, яка відображає залежність між фактичними значеннями інтегрального індексу IDEM (по осі X) та значеннями, прогнозованими нейронною мережею ANN (по осі Y) для моделі M2.

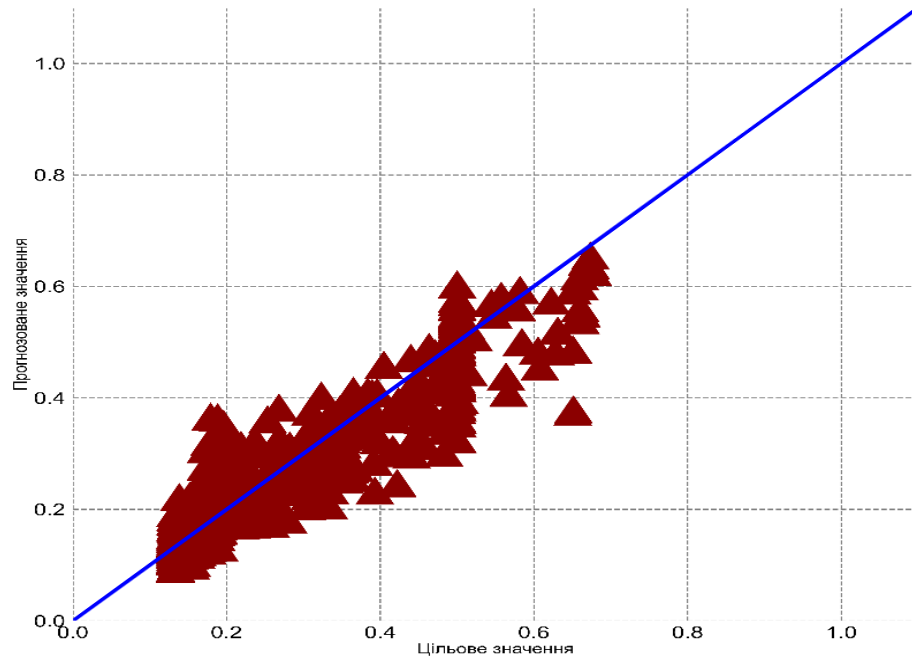


Рис. 5.17. Порівняння фактичних та прогнозованих значень інтегрального індексу IDEM (M2)

Джерело: розроблено автором.

Аналіз графіка показує, що точки розсіювання формують досить щільний кластер уздовж діагональної лінії, що свідчить про високу якість апроксимації. На відміну від попередніх моделей, тут чітко простежується лінійна залежність: зі зростанням фактичного значення IDEM відповідно зростає і прогнозоване значення.

Основна маса точок зосереджена у діапазоні приблизно від 0,15 до 0,65 за вхідними значеннями та від 0,15 до 0,60 за прогнозованими, що відповідає реальному розподілу сценаріїв. Важливо, що розсіювання точок навколо лінії $y=x$ є відносно невеликим, що свідчить про низький рівень помилки моделі.

Разом із тим, спостерігається певна систематична особливість: для вищих значень IDEM (понад 0,55–0,60) модель дещо недооцінює результат, тобто прогнозовані значення розташовані трохи нижче діагоналі. Це є типовим

ефектом для нейронних мереж і пов'язано з частковим згладжуванням екстремальних значень.

Для нижнього діапазону значень (0,10–0,20) також спостерігається незначне завищення прогнозу, однак ця похибка є невеликою і не має суттєвого впливу на загальну якість моделі.

На рисунку 5.18 представлено гістограму розподілу абсолютних помилок прогнозування інтегрального індексу IDEM, отриманих за допомогою нейронної мережі ANN для моделі М6. По осі абсцис відкладено значення помилки, тоді як по осі ординат – кількість спостережень, що відповідають відповідному інтервалу.

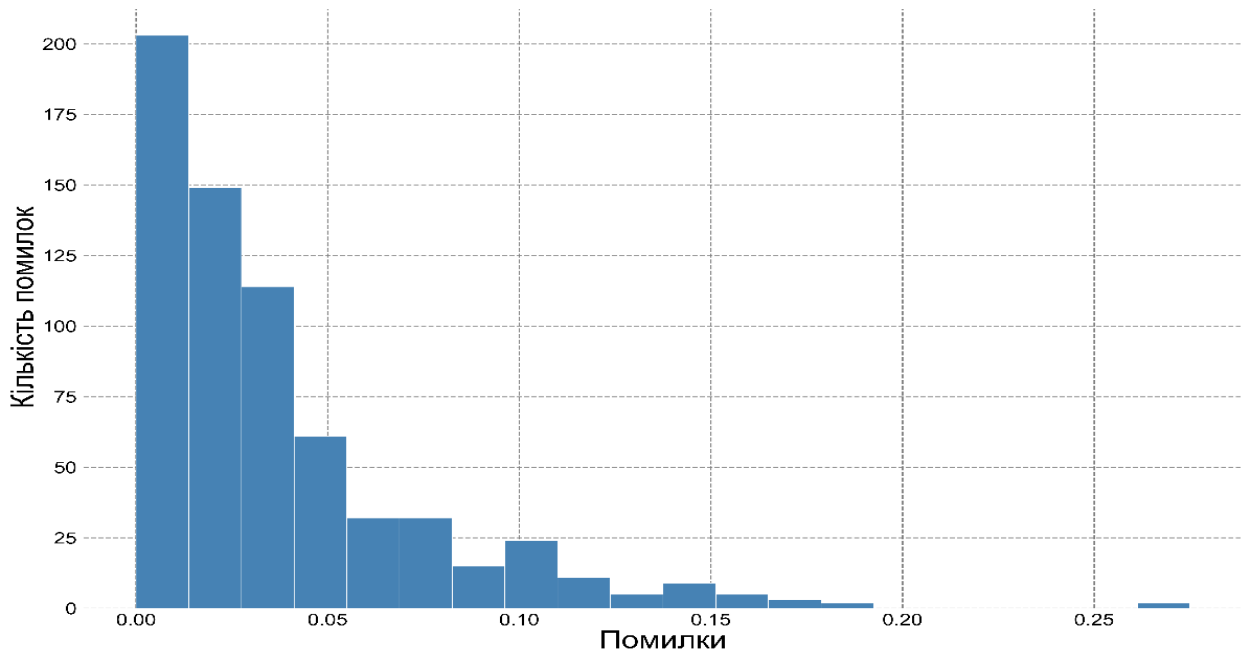


Рис. 5.18. Розподіл помилок прогнозування нейронної мережі М1

Джерело: розроблено автором.

Аналіз гістограми показує, що переважна більшість помилок зосереджена у нижньому діапазоні значень, приблизно від 0,00 до 0,05. Найбільша щільність спостерігається в інтервалі 0,01–0,03, що свідчить про високу точність прогнозування для основної частини сценаріїв. Така концентрація помилок поблизу нуля є характерною ознакою добре навченої моделі.

Розподіл має виражену правосторонню асиметрію: зі збільшенням значення помилки частота різко зменшується. Це означає, що випадки з великими відхиленнями прогнозу від фактичних значень зустрічаються значно рідше. Наявний довгий «правий хвіст» розподілу, який досягає приблизно 0,25–0,27, вказує на існування окремих сценаріїв із підвищеною похибкою.

Подібні випадки можуть бути пов'язані з:

- крайніми значеннями вхідних параметрів (Out1–Out5);
- складною нелінійною взаємодією факторів;
- недостатньою представленістю певних сценаріїв у навчальній вибірці;
- ефектом згладжування прогнозів нейронною мережею.

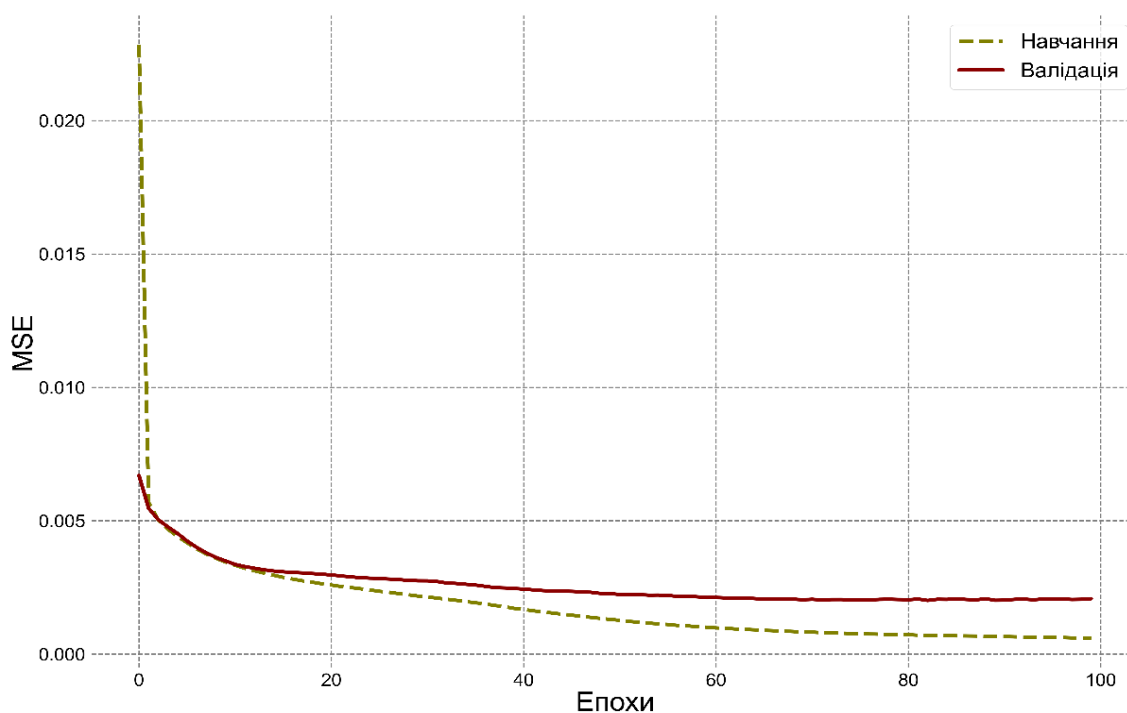
Водночас важливо відзначити, що частка таких відхилень є незначною, і вони не впливають суттєво на загальну якість моделі.

Практично відсутня концентрація помилок у високому діапазоні (понад 0,10), що додатково підтверджує стабільність моделі. У порівнянні з попередніми конфігураціями ANN, модель М6 демонструє значно кращий розподіл помилок із чітким зміщенням у сторону малих значень.

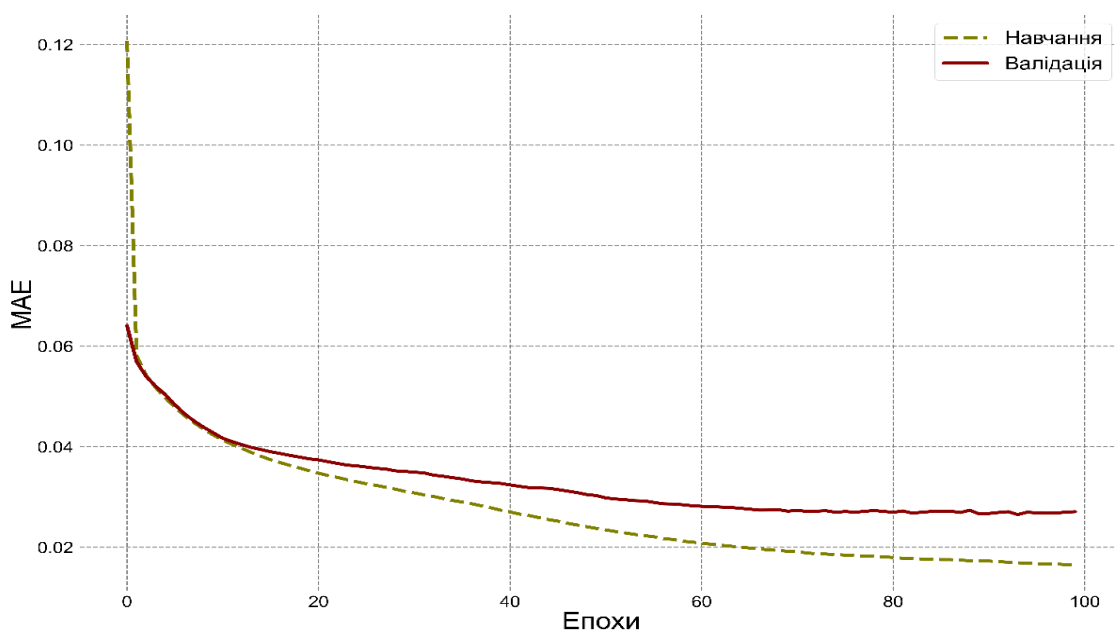
З практичної точки зору це означає, що нейронна мережа:

- забезпечує високу точність прогнозування для більшості сценаріїв;
- має стабільну поведінку;
- характеризується низьким рівнем середньої помилки;
- допускає лише поодинокі випадки значних відхилень.

Рисунки 5.19а та 5.19б показують порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) навчальних та валідаційних вибірок моделі М3.



(a)



(б)

Рис. 5.19. Порівняння метрик MSE та MAE навчальних та валідаційних вибірок моделі M3

Джерело: розроблено автором.

Представлені у таблиці 5.14 результати відображають динаміку зміни основних метрик помилки нейронної мережі у процесі навчання та валідації для задачі прогнозування інтегрального індексу IDEM.

**Динаміка зміни показників помилки у процесі навчання та валідації
моделі М3**

Метрика	MSE (max)	MSE (min)	MAE (max)	MAE (min)
Навчальна вибірка	0,0229	0,0006	0,1208	0,0166
Валідаційна вибірка	0,0067	0,0021	0,0641	0,0271

Джерело: розроблено автором

Представлені результати характеризують ефективність навчання нейронної мережі ANN для моделі М3. Отримані значення дозволяють оцінити як початковий стан моделі, так і її фінальну точність після завершення процесу навчання.

На початковому етапі навчання модель демонструє відносно помірні значення помилки. Для навчальної вибірки MSE становить 0,0229, а MAE – 0,1208, тоді як для валідаційної вибірки відповідні значення дорівнюють 0,0067 та 0,0641. Вже на цьому етапі помітно, що модель має кращу початкову узгодженість порівняно з попередніми варіантами (наприклад, М2), що свідчить про ефективнішу ініціалізацію або швидшу адаптацію оптимізатора Adam.

У процесі навчання відбувається різке зниження помилок. Мінімальне значення MSE для навчальної вибірки досягає 0,0006, що є дуже низьким показником і свідчить про майже повну апроксимацію залежності між вхідними параметрами та інтегральним індексом IDEM. Для валідаційної вибірки мінімальне значення MSE становить 0,0021, що також відповідає високому рівню точності.

Аналогічна тенденція спостерігається для показника MAE. Мінімальні значення становлять 0,0166 для навчальної вибірки та 0,0271 для валідаційної. Це означає, що середня абсолютна помилка прогнозування знаходиться на рівні приблизно 2–3 % шкали індексу IDEM, що можна оцінити як дуже високий рівень точності.

Аналіз динаміки змін показує:

- зменшення MSE для навчальної вибірки приблизно у 38 разів;
- зменшення MSE для валідаційної вибірки приблизно у 3 рази;
- зменшення MAE приблизно у 7 разів.

Це свідчить про високу ефективність процесу оптимізації та швидку збіжність моделі. Разом із тим, варто звернути увагу на певну різницю між мінімальними значеннями помилки для навчальної та валідаційної вибірок. Для MSE ця різниця становить приблизно 0,0015, а для MAE – близько 0,0105. Це може вказувати на легку тенденцію до перенавчання, коли модель дещо краще відтворює навчальні дані, ніж узагальнює нові сценарії. Однак ця різниця не є критичною і залишається в межах допустимих значень.

Таким чином, модель М3 демонструє:

- високу швидкість навчання;
- дуже низькі значення помилки;
- добру узагальнюючу здатність;
- незначні ознаки перенавчання, які не впливають суттєво на якість прогнозування.

На рис. 5.20 представлено діаграму розсіювання, яка відображає залежність між фактичними значеннями інтегрального індексу IDEM (по осі X) та значеннями, прогнозованими нейронною мережею ANN (по осі Y) для моделі М3.

Аналіз графіка показує, що точки формують досить щільний кластер уздовж діагоналі, що свідчить про високу якість апроксимації. Модель демонструє чітко виражену лінійну залежність: зі зростанням фактичного значення IDEM прогнозоване значення також зростає, що підтверджує здатність ANN коректно відтворювати структуру залежностей.

Основна частина точок зосереджена у діапазоні приблизно 0,15–0,65 за фактичними значеннями та 0,15–0,60 за прогнозованими, що відповідає характеру сформованого сценарного простору. Розсіювання точок навколо лінії $y=x$ є відносно невеликим, що вказує на низький рівень помилки прогнозування.

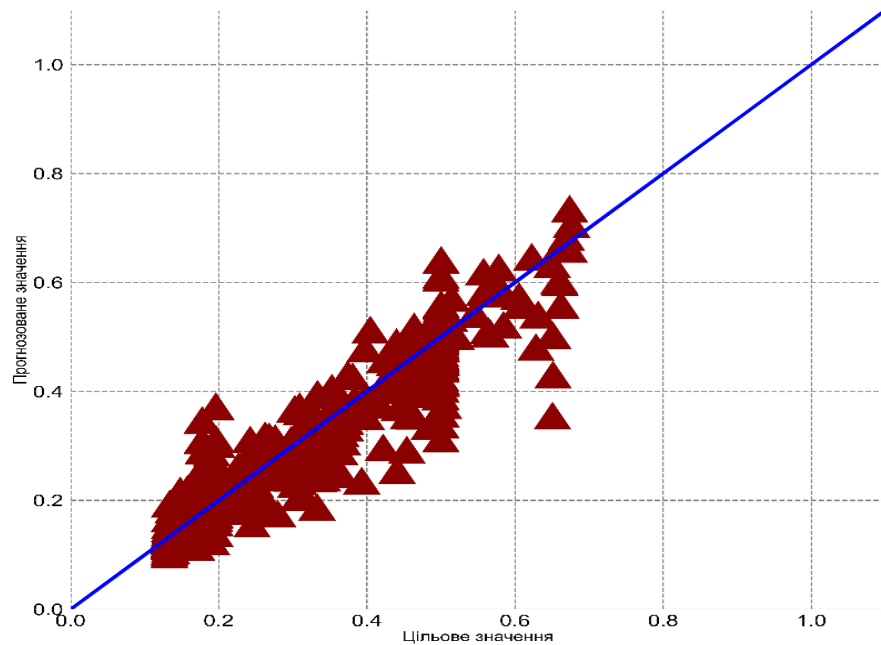


Рис. 5.20. Порівняння фактичних та прогнозованих значень інтегрального індексу IDEM (M3)

Джерело: розроблено автором.

Разом із тим, спостерігається певна систематична особливість: у верхньому діапазоні значень (понад 0,55–0,60) модель має тенденцію до незначного недооцінювання результату – частина точок розташована нижче діагональної лінії. У нижньому діапазоні (близько 0,10–0,20) навпаки спостерігається слабке завищення прогнозу. Така поведінка є типовою для нейронних мереж і пов’язана з ефектом згладжування екстремальних значень.

З практичної точки зору це означає, що модель M3:

- забезпечує високу точність прогнозування;
- добре відтворює нелінійну залежність між факторами Out1–Out5 та IDEM;
- демонструє стабільну поведінку у всьому робочому діапазоні;
- має незначні систематичні відхилення лише у крайніх значеннях.

На рис. 5.21 представлено гістограму розподілу абсолютних помилок прогнозування інтегрального індексу IDEM для моделі M3. По осі абсцис

відкладено величину помилки, тоді як по осі ординат – кількість відповідних спостережень.

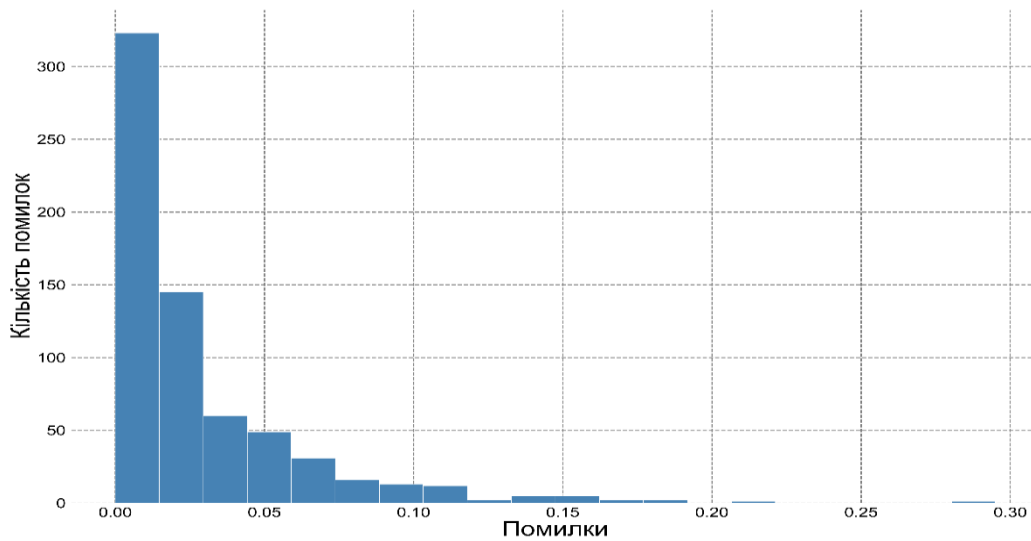


Рис. 5.21. Розподіл помилок прогнозування нейронної мережі М3

Джерело: розроблено автором.

Аналіз гістограми показує, що основна частина помилок зосереджена у нижньому діапазоні значень, приблизно від 0,00 до 0,04. Найбільша щільність спостерігається в інтервалі 0,01–0,02, що свідчить про дуже високу точність прогнозування для більшості сценаріїв. Така концентрація значень поблизу нуля є характерною ознакою ефективно навченої нейронної мережі.

Розподіл має чітко виражену правосторонню асиметрію. Зі збільшенням величини помилки частота різко зменшується, що означає, що випадки з великими відхиленнями є поодинокими. Спостерігається довгий «правий хвіст», який досягає приблизно 0,25–0,30, однак такі значення мають дуже низьку частоту.

Наявність цього хвоста свідчить про існування окремих складних сценаріїв, у яких модель допускає більші похибки. Це може бути пов'язано з:

- крайніми комбінаціями вхідних параметрів;
- нелінійними ефектами, які складно апроксимуються;
- обмеженнями сигмоїдної функції активації, зокрема ефектом насичення;

– недостатньою представленістю таких сценаріїв у навчальній вибірці.

Водночас важливо підкреслити, що переважна більшість значень знаходиться у зоні низьких помилок (до 0,03–0,04), що підтверджує високу загальну точність моделі.

Практично відсутні значення помилки понад 0,10, що свідчить про стабільність моделі та відсутність значних систематичних відхилень. Це є суттєвою перевагою порівняно з менш ефективними конфігураціями нейронних мереж.

З практичної точки зору отриманий розподіл означає, що модель M3:

- забезпечує дуже високу точність прогнозування;
- має стабільну поведінку для більшості сценаріїв;
- допускає лише поодинокі значні відхилення.

Рисунки 5.22а та 5.22б показують порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) навчальних та валідаційних вибірок моделі M4.

Представлені у таблиці 5.15 результати відображають динаміку зміни основних метрик помилки нейронної мережі у процесі навчання та валідації для задачі прогнозування інтегрального індексу IDEM.

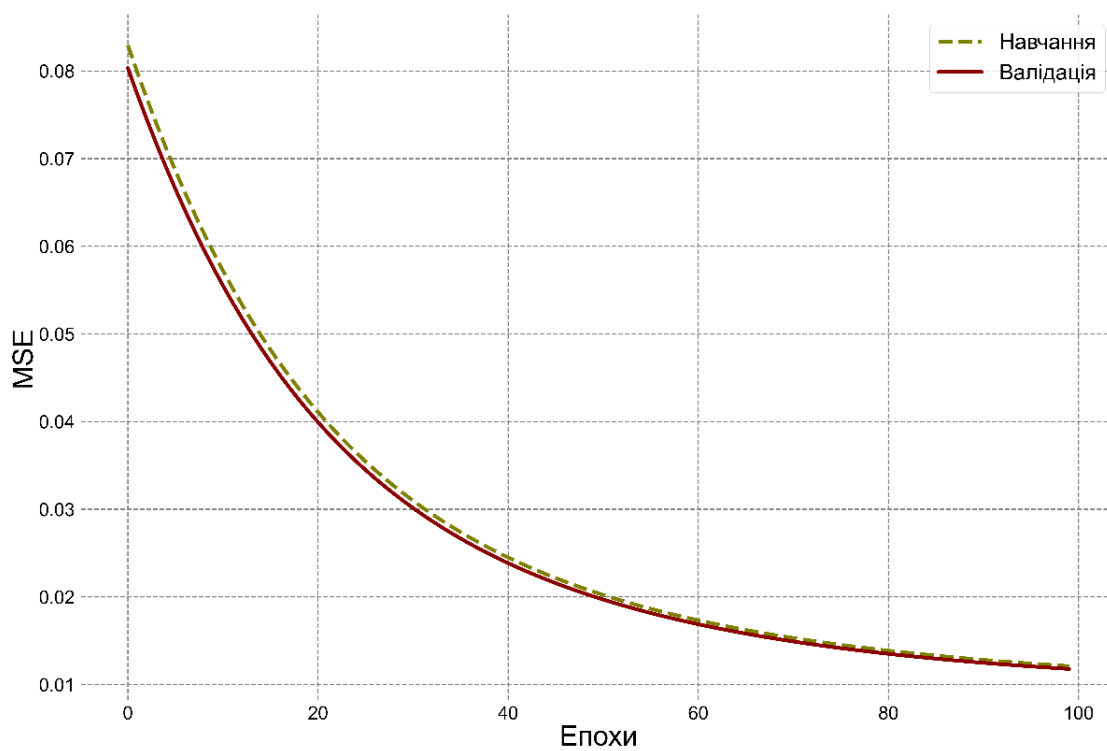
Таблиця 5.15

Динаміка зміни показників помилки у процесі навчання та валідації моделі M4

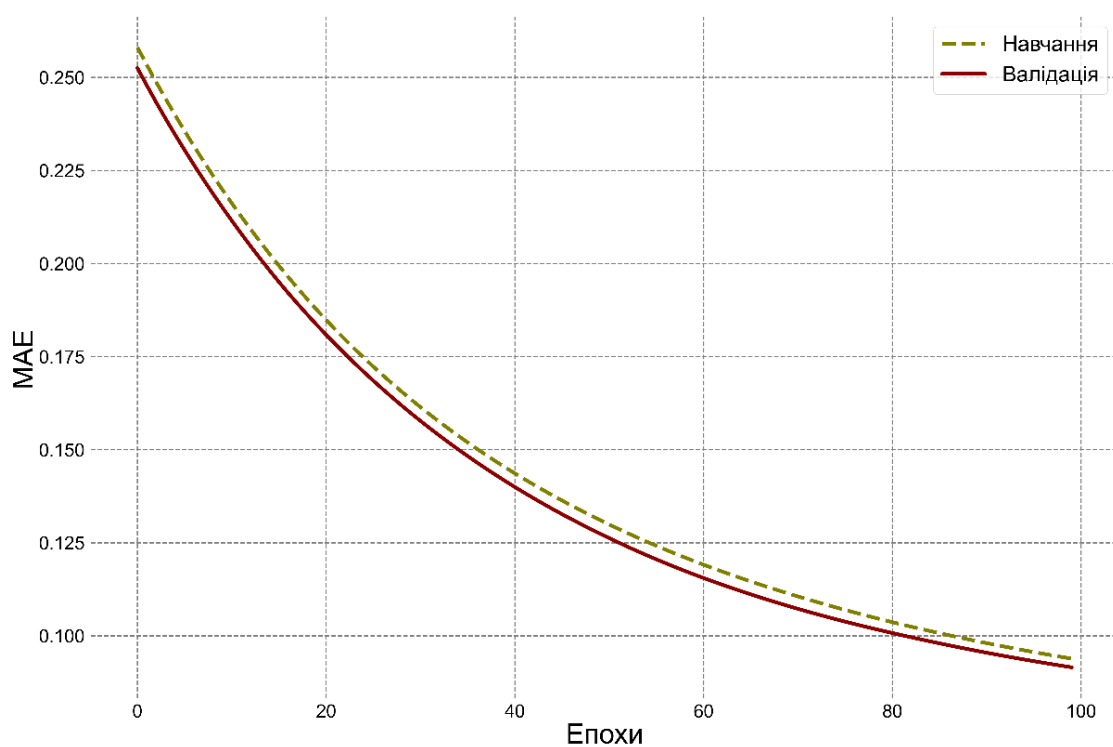
Метрика	MSE (max)	MSE (min)	MAE (max)	MAE (min)
Навчальна вибірка	0,0829	0,0121	0,2581	0,0939
Валідаційна вибірка	0,0803	0,0118	0,2525	0,0916

Джерело: розроблено автором.

Представлені результати характеризують ефективність навчання нейронної мережі ANN для моделі M4. Дана конфігурація дозволяє оцінити вплив простої схеми оптимізації на якість апроксимації інтегрального індексу IDEM.



(а)



(б)

Рис. 5.22. Порівняння метрик MSE та MAE навчальних та валідаційних вибірок моделі M4

Джерело: розроблено автором.

На початковому етапі навчання модель демонструє відносно високі значення помилки: MSE для навчальної вибірки становить 0,0829, а для валідаційної – 0,0803. Відповідно, значення MAE дорівнюють 0,2581 та 0,2525. Важливо відзначити, що значення помилок для навчальної та валідаційної вибірок практично однакові, що свідчить про відсутність початкового перекосу моделі та рівномірний розподіл помилок.

У процесі навчання спостерігається поступове зниження значень помилок. Мінімальні значення MSE становлять 0,0121 для навчальної вибірки та 0,0118 для валідаційної, що свідчить про покращення точності моделі. Аналогічно, значення MAE зменшуються до 0,0939 та 0,0916 відповідно.

Однак, порівняно з попередніми моделями, зниження помилок є менш вираженим. Зокрема, MSE зменшується приблизно у 6–7 разів, а MAE зменшується приблизно у 2,7 рази. Це свідчить про повільніший процес навчання та менш ефективну оптимізацію вагових коефіцієнтів.

Важливою особливістю є дуже близькі значення помилок для навчальної та валідаційної вибірок як на початковому, так і на фінальному етапах. Різниця між мінімальними значеннями MSE становить лише близько 0,0003, а для MAE – приблизно 0,0023. Це свідчить про відсутність перенавчання та високу стабільність моделі. Фактично ANN демонструє однакову поведінку як на навчальних, так і на нових даних.

Разом із тим, така стабільність має і зворотний бік. Відносно високі значення помилок на фінальному етапі ($MAE \approx 0,09$) вказують на те, що модель не досягає високої точності апроксимації. У порівнянні з моделлю M3, де MAE знижується до рівня близько 0,02–0,03, модель M4 демонструє значно гірші результати.

Це можна пояснити використанням оптимізатора SGD, який, незважаючи на свою простоту, має обмежену ефективність у задачах із складними нелінійними залежностями. SGD потребує більш точного налаштування параметра швидкості навчання та часто демонструє повільну збіжність, особливо у поєднанні з глибшими нейронними мережами.

Таким чином, модель М4 характеризується:

- стабільним процесом навчання;
- відсутністю перенавчання;
- помірною точністю прогнозування;
- відносно повільною збіжністю.

На рис. 5.23 представлено діаграму розсіювання, яка ілюструє залежність між фактичними значеннями інтегрального індексу IDEM (по осі X) та значеннями, прогнозованими нейронною мережею ANN (по осі Y) для моделі М4.

Аналіз графіка показує, що точки розподілені значно ширше навколо діагональної лінії порівняно з моделями М3 та М6, що свідчить про нижчу точність прогнозування. Хоча загальна тенденція зростання прогнозованих значень разом із фактичними зберігається, залежність є менш чіткою, а розсіювання – більш вираженим.

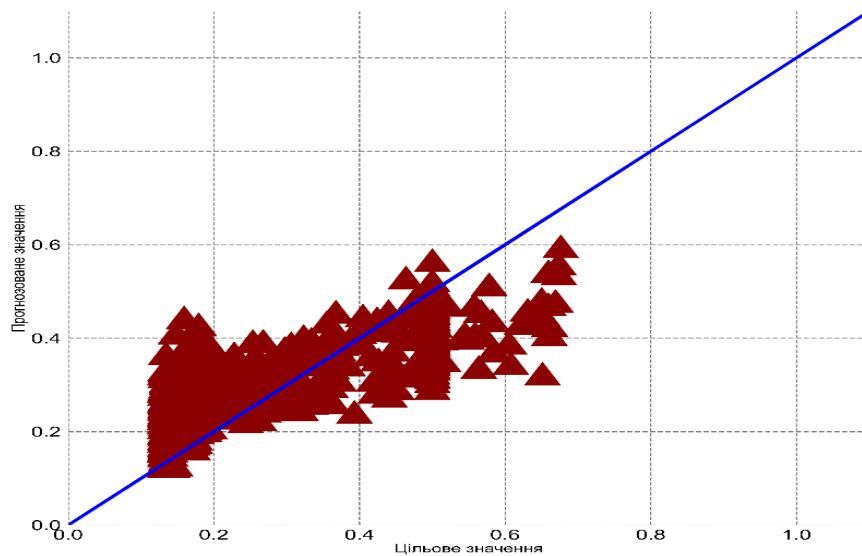


Рис. 5.23. Порівняння фактичних та прогнозованих значень інтегрального індексу IDEM (М4)

Джерело: розроблено автором.

Основна частина точок зосереджена у діапазоні приблизно 0,15–0,65 за фактичними значеннями та 0,20–0,50 за прогнозованими. При цьому

спостерігається характерне «стиснення» прогнозів: модель має тенденцію зменшувати варіативність вихідних значень. Це проявляється у тому, що: для високих значень IDEM (понад 0,50–0,60) прогнози суттєво недооцінюються; для низьких значень (0,10–0,20) спостерігається завищення результатів.

Таким чином, модель демонструє виражений ефект регресії до середнього, коли крайні значення згладжуються та наближаються до середнього рівня. Розсіювання точок навколо лінії $y=x$ є значним, що вказує на підвищений рівень помилки. Відсутність щільного кластеру вздовж діагоналі підтверджує обмежену здатність моделі точно відтворювати складні нелінійні залежності між вхідними параметрами та інтегральним індексом IDEM.

Причиною такої поведінки, ймовірно, є використання оптимізатора SGD, який характеризується:

- повільною збіжністю;
- чутливістю до вибору швидкості навчання;
- менш ефективною адаптацією вагових коефіцієнтів у порівнянні з адаптивними алгоритмами (Adam, RMSprop).

З практичної точки зору це означає, що модель M4:

- має обмежену точність прогнозування;
- недостатньо добре відтворює крайні значення IDEM;
- демонструє стабільну, але згладжену реакцію на зміну вхідних параметрів;
- може використовуватись для грубих оцінок, але не для точного прогнозування.

На рис. 5.24 представлено гістограму розподілу абсолютних помилок прогнозування інтегрального індексу IDEM для моделі M4. По осі абсцис відкладено величину помилки, по осі ординат – кількість відповідних спостережень.

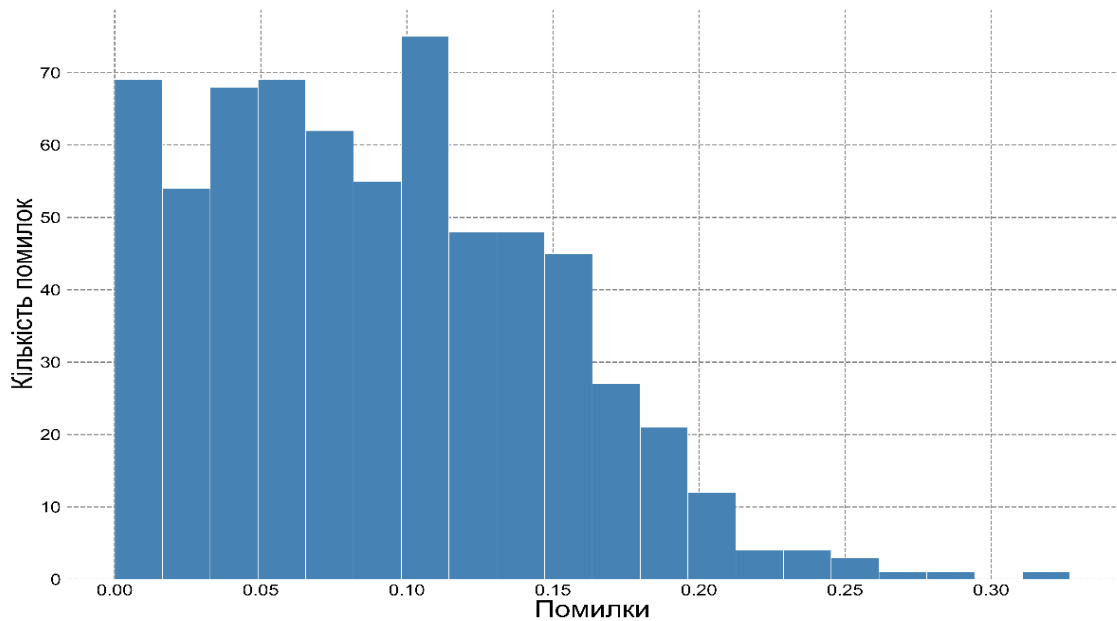


Рис. 5.24. Розподіл помилок прогнозування нейронної мережі М4

Джерело: розроблено автором.

Аналіз гістограми показує, що розподіл помилок є значно ширшим порівняно з моделями М3 та М6. Основна частина значень зосереджена у діапазоні приблизно 0,02–0,12, при цьому пік розподілу зміщений у зону 0,05–0,10. Це свідчить про помірну точність моделі, оскільки значна частина прогнозів має відносно високі відхилення.

Розподіл має правосторонню асиметрію, однак вона є менш вираженою, ніж у більш точних моделях. Це означає, що частка великих помилок є відносно значною. Спостерігається довгий правий хвіст, який досягає значень близько 0,30–0,32, що вказує на наявність сценаріїв із суттєвими відхиленнями прогнозу від фактичних значень.

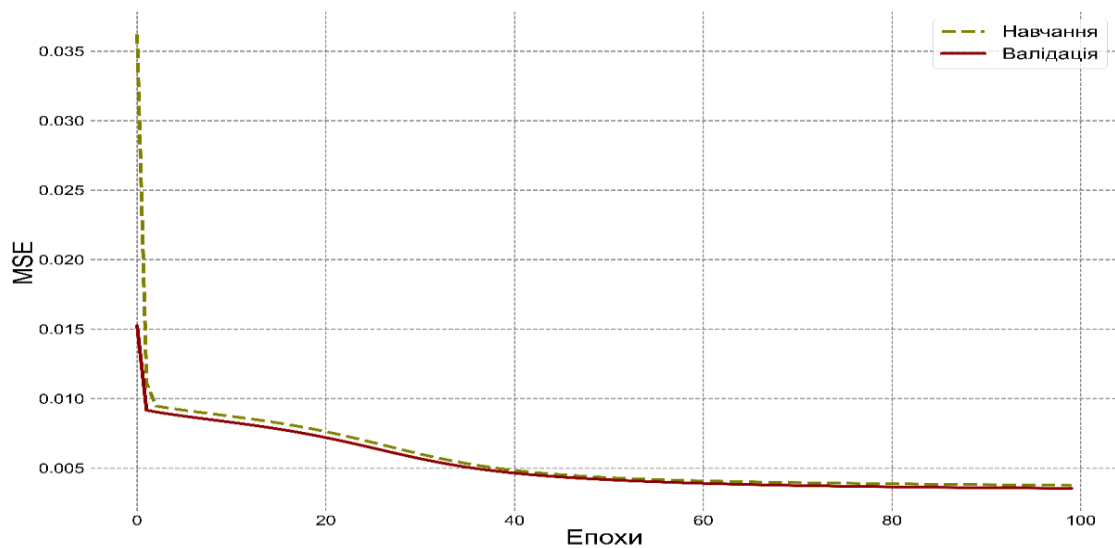
Важливо відзначити, що на відміну від ефективніших моделей, тут відсутня чітка концентрація помилок у зоні дуже малих значень (менше 0,02). Це означає, що модель рідко досягає високої точності прогнозування навіть для типових сценаріїв.

Також помітно, що розподіл є більш «плоским», без різко вираженого піку, що свідчить про нестабільність точності моделі та значну варіативність помилок.

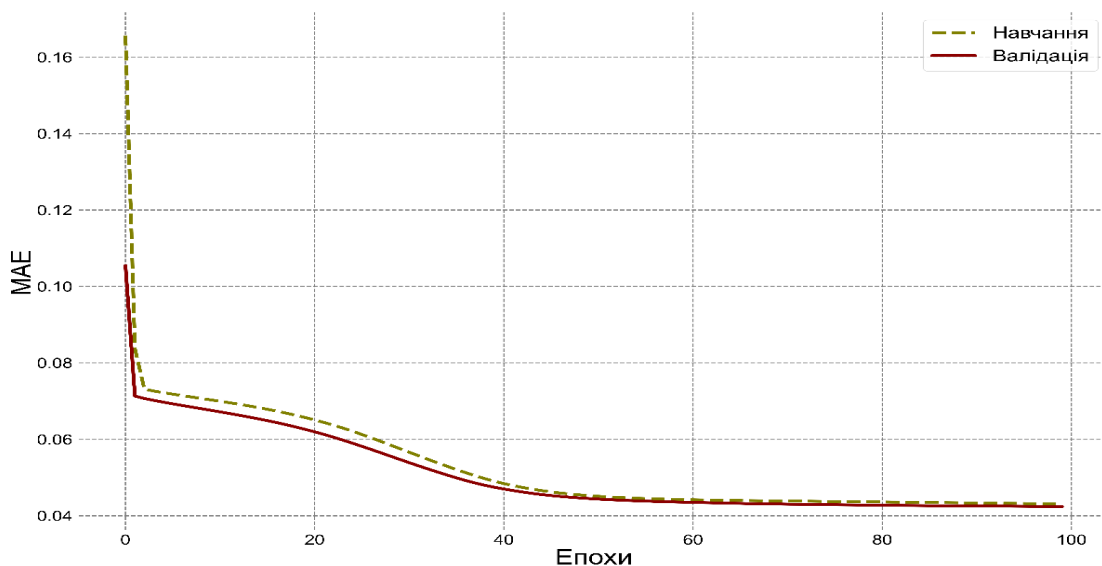
З практичної точки зору це означає, що модель М4:

- демонструє середній рівень точності прогнозування;
- характеризується значним розсіюванням помилок;
- має помітну частку великих відхилень;
- не забезпечує стабільно точних результатів.

Рисунки 5.25а та 5.25б показують порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) навчальних та валідаційних вибірок моделі M5.



(а)



(б)

Рис. 5.25. Порівняння метрик MSE та MAE навчальних та валідаційних вибірок моделі M5

Джерело: розроблено автором.

Представлені у таблиці 5.16 результати відображають динаміку зміни основних метрик помилки нейронної мережі у процесі навчання та валідації для задачі прогнозування інтегрального індексу IDEM.

Таблиця 5.16

Динаміка зміни показників помилки у процесі навчання та валідації моделі M5

Метрика	MSE (max)	MSE (min)	MAE (max)	MAE (min)
Навчальна вибірка	0,0362	0,0038	0,1657	0,0431
Валідаційна вибірка	0,0152	0,0035	0,1055	0,0424

Джерело: розроблено автором.

Представлені результати відображають ефективність навчання нейронної мережі ANN для моделі M5. На початковому етапі навчання значення помилок є помірними: MSE для навчальної вибірки становить 0,0362, а для валідаційної – 0,0152. Відповідно, MAE дорівнює 0,1657 та 0,1055. Вже на цьому етапі видно, що модель має кращі стартові характеристики порівняно з моделлю M4, що може свідчити про більш ефективну роботу оптимізатора RMSprop у початковій фазі навчання.

У процесі навчання спостерігається суттєве зниження значень помилок. Мінімальні значення MSE становлять 0,0038 для навчальної вибірки та 0,0035 для валідаційної, що вказує на високу точність моделі. Аналогічно, MAE зменшується до 0,0431 та 0,0424 відповідно.

Аналіз динаміки змін показує:

- зменшення MSE приблизно у 9–10 разів для навчальної вибірки;
- зменшення MSE приблизно у 4,3 рази для валідаційної вибірки;
- зменшення MAE приблизно у 3,8 рази.

Це свідчить про ефективний процес навчання та хорошу збіжність нейронної мережі.

Особливо важливою є практично повна відповідність мінімальних значень помилки для навчальної та валідаційної вибірок. Різниця між MSE

становить лише близько 0,0003, а для MAE – менше 0,001. Це є чітким індикатором відсутності перенавчання та високої узагальнюючої здатності моделі.

З практичної точки зору отримані результати можна оцінити як високі. Середня абсолютна помилка на рівні приблизно 0,04 означає відхилення близько 4 % від шкали індексу IDEM, що є хорошим результатом для задач прогнозування інтегральних показників.

Таким чином, модель M5 характеризується:

- стабільним та ефективним процесом навчання;
- відсутністю перенавчання;
- високою точністю прогнозування.

На рис. 5.26 представлено діаграму розсіювання, що відображає залежність між фактичними значеннями інтегрального індексу IDEM (по осі X) та прогнозованими значеннями, отриманими нейронною мережею ANN (по осі Y) для моделі M5.

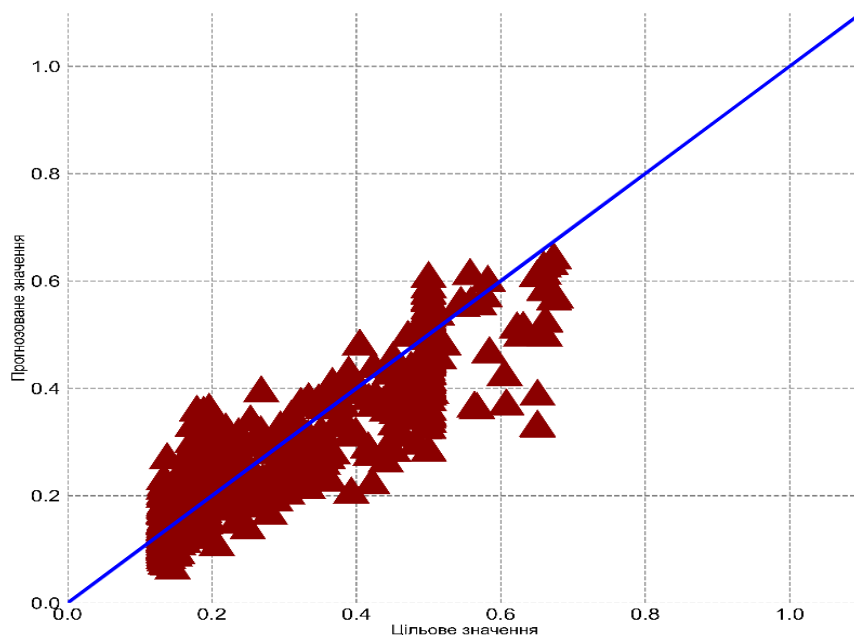


Рис. 5.26. Порівняння фактичних та прогнозованих значень інтегрального індексу IDEM (M5)

Джерело: розроблено автором.

Аналіз графіка показує, що точки формують досить чіткий кластер уздовж діагональної лінії, що свідчить про хорошу якість апроксимації. Порівняно з моделлю M4, розсіювання є значно меншим, а залежність між фактичними та прогнозованими значеннями – більш вираженою.

Основна частина точок зосереджена у діапазоні приблизно 0,15–0,65 за фактичними значеннями та 0,15–0,60 за прогнозованими. При цьому модель досить добре відтворює загальну тенденцію: зі зростанням значення IDEM відповідно зростає і прогноз.

Разом із тим, спостерігається певний ефект згладжування крайніх значень: для високих значень IDEM (понад 0,55–0,60) модель має тенденцію до недооцінювання результату; для нижніх значень (близько 0,10–0,20) спостерігається незначне завищення прогнозів.

Однак ці відхилення є менш вираженими, ніж у моделі M4, що свідчить про покращення якості навчання завдяки використанню оптимізатора RMSprop.

Розсіювання точок навколо лінії $y=x$ є помірним: воно більше, ніж у моделях з оптимізатором Adam (M3, M6), але значно менше, ніж у випадку SGD. Це означає, що модель M5 забезпечує баланс між стабільністю та точністю.

З практичної точки зору це означає, що модель M5:

- забезпечує достатньо високу точність прогнозування;
- добре відтворює нелінійну залежність між Out1–Out5 та IDEM;
- демонструє стабільну поведінку;
- має помірні систематичні відхилення у крайніх діапазонах.

На рис. 5.27 представлено гістограму розподілу абсолютних помилок прогнозування інтегрального індексу IDEM для моделі M5. По осі абсцис відкладено величину помилки, по осі ординат – кількість відповідних спостережень.

Аналіз гістограми показує, що основна маса помилок зосереджена у нижньому діапазоні значень – приблизно від 0,00 до 0,05. Найбільша щільність

спостерігається в інтервалі 0,01–0,03, що свідчить про достатньо високу точність прогнозування для більшості сценаріїв.

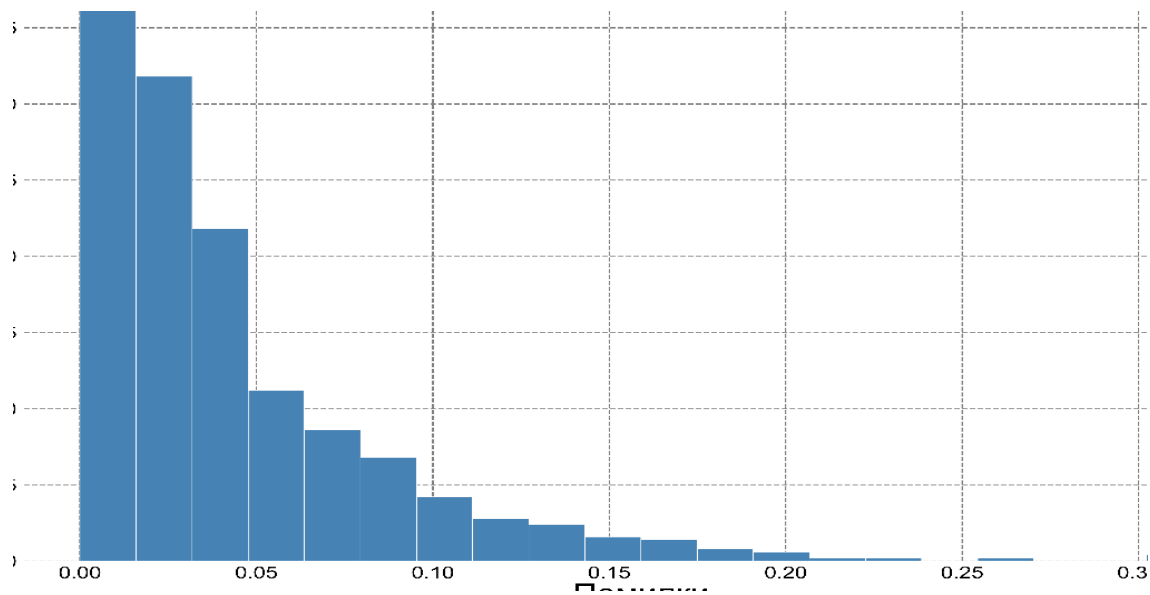


Рис. 5.27. Розподіл помилок прогнозування нейронної мережі M5

Джерело: розроблено автором.

Розподіл має виражену правосторонню асиметрію: зі збільшенням значення помилки частота різко зменшується. Це означає, що великі відхилення зустрічаються значно рідше. Водночас спостерігається довгий «правий хвіст», який досягає значень близько 0,30–0,32, що вказує на наявність окремих сценаріїв із підвищеною похибкою. Порівняно з моделлю M4, розподіл є більш зміщеним у сторону малих значень, що підтверджує підвищення точності. Водночас, у порівнянні з моделями M3 та M6, концентрація помилок біля нуля є менш вираженою, що свідчить про дещо нижчу ефективність.

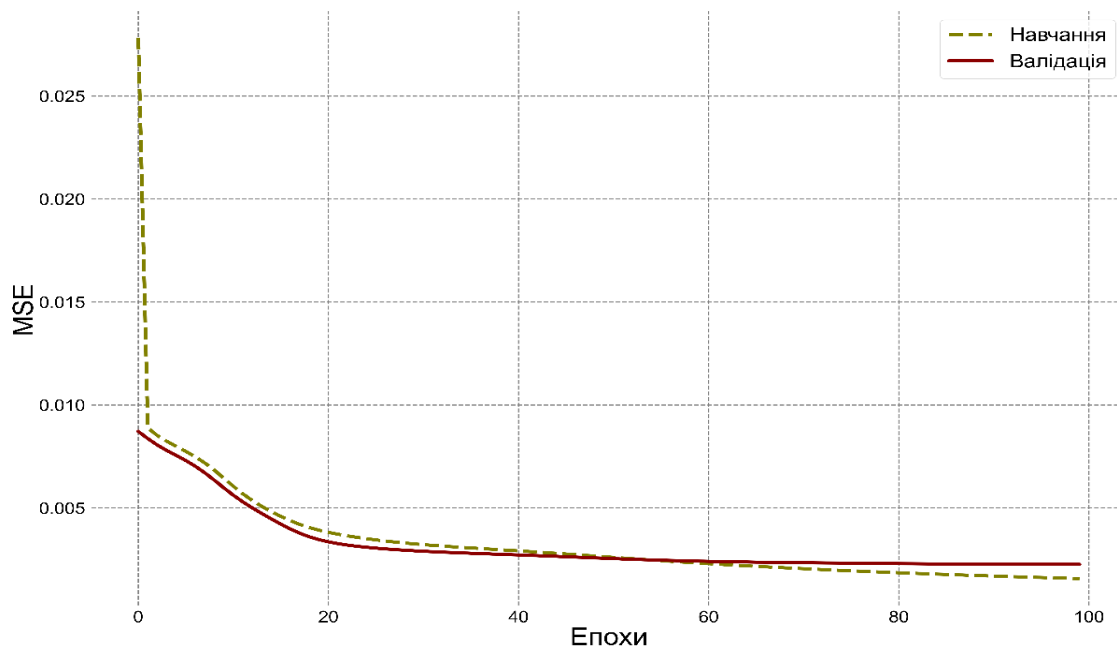
Також варто відзначити, що помилки в діапазоні понад 0,10 мають помітну, хоча й не домінуючу частку. Це означає, що модель не завжди забезпечує стабільно високу точність для всіх сценаріїв, особливо у випадках складних або крайніх комбінацій вхідних параметрів.

З практичної точки зору це означає, що модель M5:

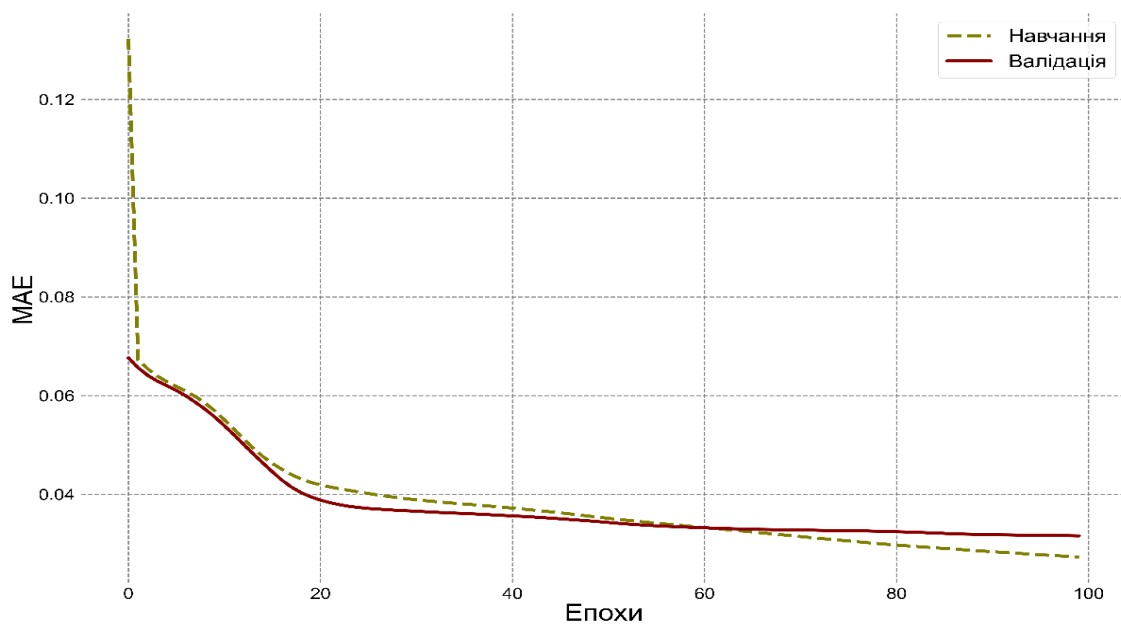
- забезпечує достатньо високу точність прогнозування;
- має помірне розсіювання помилок;

– допускає окремі випадки значних відхилень;

Рисунки 5.28а та 5.28б показують порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) навчальних та валідаційних вибірок моделі М6.



(а)



(б)

Рис. 5.28. Порівняння метрик MSE та MAE навчальних та валідаційних вибірок моделі М6

Джерело: розроблено автором.

Представлені у таблиці 5.17 результати відображають динаміку зміни основних метрик помилки нейронної мережі у процесі навчання та валідації для задачі прогнозування інтегрального індексу IDEM.

Таблиця 5.17

Динаміка зміни показників помилки у процесі навчання та валідації моделі М6

Метрика	MSE (max)	MSE (min)	MAE (max)	MAE (min)
Навчальна вибірка	0,0278	0,0016	0,1323	0,0273
Валідаційна вибірка	0,0087	0,0023	0,0676	0,0316

Джерело: розроблено автором.

Представлені результати характеризують ефективність навчання нейронної мережі ANN для моделі М6. Така конфігурація є однією з найбільш сучасних і ефективних у задачах машинного навчання, що дозволяє очікувати високої точності прогнозування.

На початковому етапі навчання модель демонструє помірні значення помилки: MSE для навчальної вибірки становить 0,0278, а для валідаційної – 0,0087. Відповідно, значення MAE дорівнюють 0,1323 та 0,0676. Порівняно з моделями М4 і М5, початкові значення помилки є нижчими, що свідчить про ефективнішу початкову адаптацію моделі завдяки використанню оптимізатора Adam.

У процесі навчання спостерігається значне зниження помилок. Мінімальне значення MSE для навчальної вибірки становить 0,0016, а для валідаційної – 0,0023. Це свідчить про високу точність апроксимації залежності між вхідними параметрами та інтегральним індексом IDEM.

Аналогічна тенденція спостерігається для показника MAE. Мінімальні значення становлять 0,0273 для навчальної вибірки та 0,0316 для валідаційної. Таким чином, середня абсолютна помилка знаходиться на рівні приблизно 3 % шкали індексу IDEM, що є дуже хорошим результатом.

Аналіз динаміки змін показує:

- зменшення MSE приблизно у 17 разів для навчальної вибірки;

- зменшення MSE приблизно у 3,8 рази для валідаційної вибірки;
- зменшення MAE приблизно у 4,8 рази.

Це свідчить про швидкий та ефективний процес навчання, а також про хорошу збіжність моделі.

Водночас спостерігається певна різниця між значеннями помилки для навчальної та валідаційної вибірок. Для MSE ця різниця становить приблизно 0,0007, а для MAE – близько 0,0043. Це може вказувати на слабо виражену тенденцію до перенавчання, однак ці відхилення є незначними і не впливають суттєво на загальну якість моделі.

З практичної точки зору отримані результати свідчать про те, що модель М6 забезпечує високу точність прогнозування інтегрального індексу IDEM. Середня абсолютна помилка на рівні 0,03 означає відхилення близько 3 % від повного діапазону індексу, що є дуже хорошим показником для задач такого типу.

Таким чином, модель М6 характеризується:

- високою швидкістю навчання;
- низькими значеннями помилки;
- хорошою узагальнюючою здатністю;
- незначними ознаками перенавчання;
- високою стабільністю процесу оптимізації.

На рис. 5.29 представлено діаграму розсіювання, що відображає залежність між фактичними значеннями інтегрального індексу IDEM (по осі X) та прогнозованими значеннями, отриманими нейронною мережею ANN (по осі Y) для моделі М6.

Аналіз графіка показує, що точки розсіювання формують щільний і добре структурований кластер уздовж діагональної лінії, що свідчить про високу точність апроксимації. У порівнянні з іншими моделями, саме для М6 спостерігається найменше розсіювання та найбільш чітка відповідність між фактичними і прогнозованими значеннями.

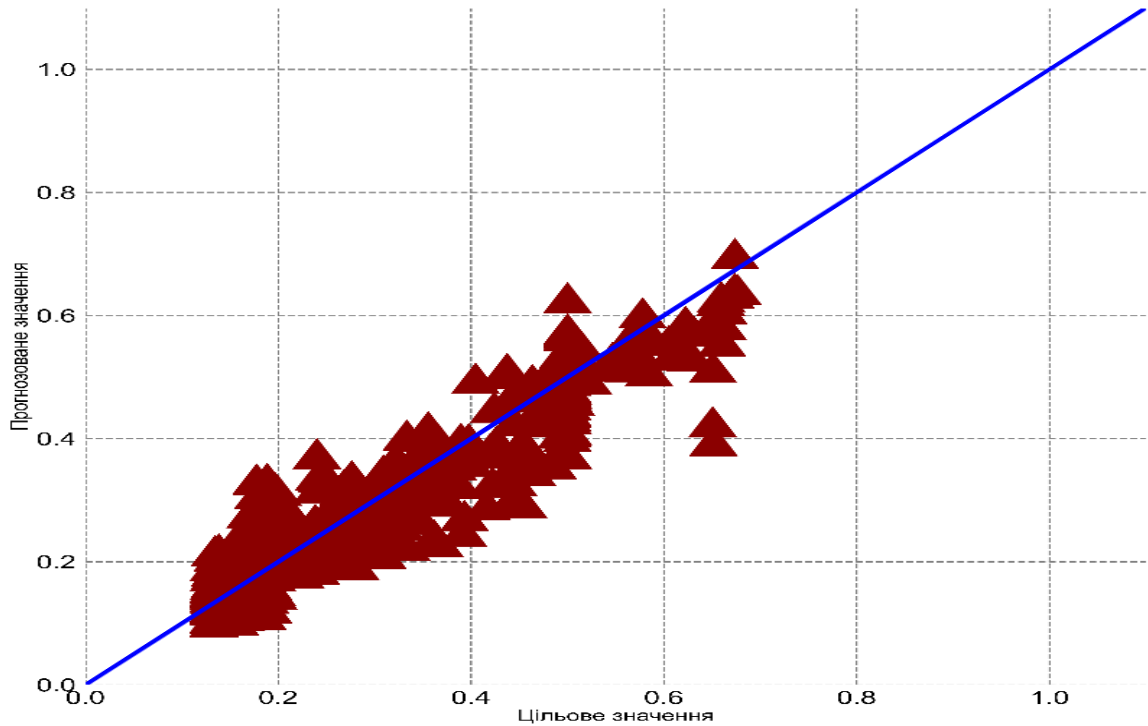


Рис. 5.29. Порівняння фактичних та прогнозованих значень інтегрального індексу IDEM (M6)

Джерело: розроблено автором.

Основна частина точок зосереджена у діапазоні приблизно 0,15–0,65 за фактичними значеннями та 0,15–0,60 за прогнозованими, що відповідає структурі сформованого сценарного простору. При цьому залежність має виражений монотонний характер: зі зростанням фактичного значення IDEM прогноз також систематично зростає.

Разом із тим, як і у випадку інших моделей, спостерігається незначний ефект згладжування крайніх значень: для високих значень IDEM (понад 0,60) модель дещо недооцінює результат; для нижнього діапазону (0,10–0,20) можливе слабке завищення прогнозів.

Однак ці відхилення є мінімальними і значно менш вираженими, ніж у моделях M4 та M5, що підтверджує перевагу використання оптимізатора Adam.

Розсіювання точок навколо лінії $y=x$ є незначним, що свідчить про низький рівень помилки прогнозування та високу узагальнюючу здатність моделі. Відсутність виражених відхилень або аномальних кластерів додатково підтверджує стабільність роботи нейронної мережі.

З практичної точки зору це означає, що модель М6:

- забезпечує дуже високу точність прогнозування;
- добре відтворює складні нелінійні залежності;
- демонструє стабільну поведінку для всіх сценаріїв;
- має мінімальні систематичні відхилення;
- є найбільш ефективною серед розглянутих конфігурацій.

На рис. 5.30 представлено гістограму розподілу абсолютних помилок прогнозування інтегрального індексу IDEM для моделі М6. По осі абсцис відкладено величину помилки, по осі ординат – кількість відповідних спостережень.

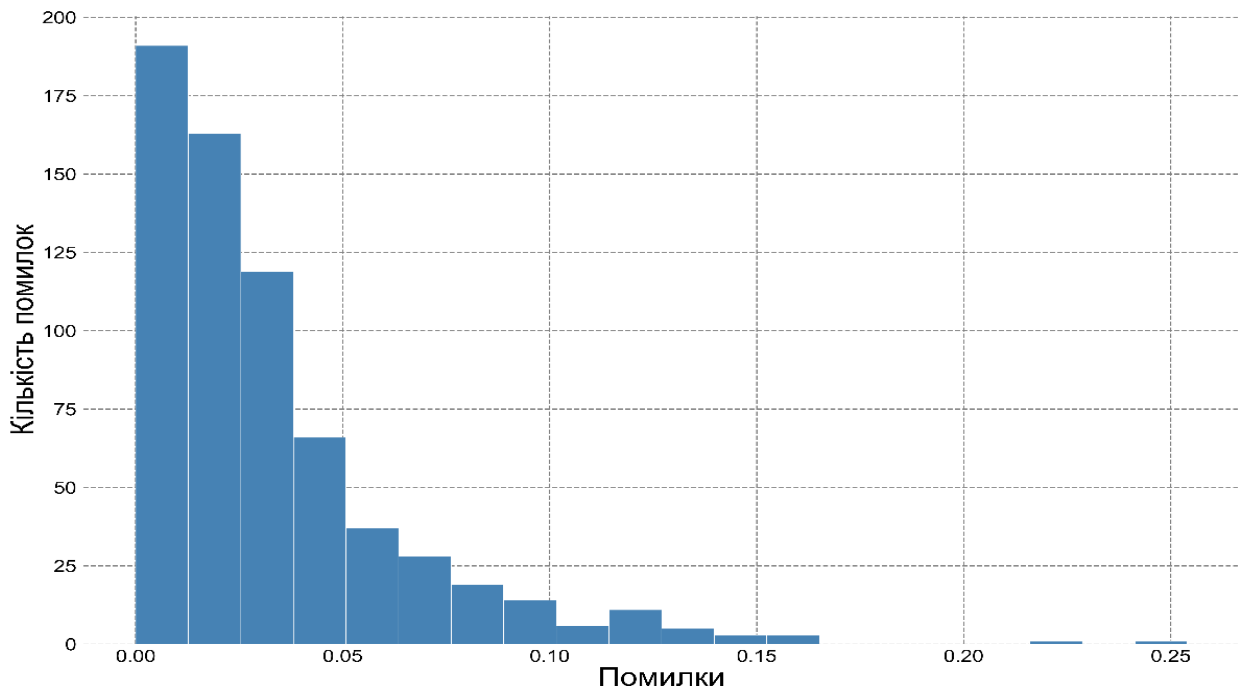


Рис. 5.30. Розподіл помилок прогнозування нейронної мережі М6

Джерело: розроблено автором.

Аналіз гістограми свідчить про високу концентрацію помилок у зоні малих значень. Основна частина спостережень зосереджена у діапазоні

приблизно 0,00–0,04, при цьому найбільша частота припадає на інтервал 0,01–0,03. Це вказує на високу точність прогнозування для переважної більшості сценаріїв.

Розподіл має чітко виражену правосторонню асиметрію: зі зростанням величини помилки кількість спостережень швидко зменшується. Довгий, але малонасичений правий хвіст досягає значень близько 0,20–0,25, що свідчить про поодинокі випадки більших відхилень.

У порівнянні з моделями M4 та M5, розподіл для M6 є більш «сконцентрованим» біля нуля, що підтверджує найвищу точність серед розглянутих конфігурацій. Також спостерігається менша частка помилок у діапазоні понад 0,05, що вказує на стабільність моделі навіть для складних сценаріїв.

Важливо відзначити, що гістограма має чітко виражений пік і швидке спадання частоти, що є характерною ознакою добре навченої моделі без суттєвого перенавчання.

З практичної точки зору це означає, що модель M6:

- забезпечує найвищу точність прогнозування;
- має мінімальне розсіювання помилок;
- характеризується стабільною поведінкою;
- демонструє низьку частоту великих відхилень;
- є найбільш надійною серед усіх протестованих моделей.

У таблиці 5.18 наведено результати порівняльного аналізу шести конфігурацій штучних нейронних мереж (M1–M6), що відрізняються типом функції активації (ReLU, tanh) та використанням оптимізатором (SGD, RMSprop, Adam). Оцінювання якості моделей здійснювалося за допомогою чотирьох ключових метрик: коефіцієнта детермінації R^2 , середньоквадратичної помилки (RMSE), середньої абсолютної помилки (MAE) та відносної помилки (MAPE).

Таблиця 5.18

**Порівняльна оцінка ефективності моделей ANN для прогнозування
інтегрального індексу IDEM**

Модель ІНМ	M1	M2	M3	M4	M5	M6
функція активації	ReLU	ReLU	ReLU	tanh	tanh	tanh
оптимізатор	SGD	RMSprop	Adam	SGD	RMSprop	Adam
R^2	0,2929	0,8691	0,9091	0,4736	0,8240	0,9036
RMSE	0,1236	0,0532	0,0443	0,1066	0,0616	0,0456
MAE	0,1059	0,0372	0,0277	0,0899	0,0433	0,0326
MAPE, %	47,93	14,75	10,28	45,02	17,27	13,61

Джерело: розроблено автором.

Отримані результати чітко демонструють суттєвий вплив вибору оптимізатора на якість прогнозування. Найгірші результати показали моделі M1 та M4, у яких використано оптимізатор SGD. Значення R^2 для цих моделей становлять відповідно 0,2929 та 0,4736, що свідчить про слабку здатність пояснювати варіацію цільової змінної. Водночас високі значення помилок (RMSE = 0,1236 та 0,1066; MAE = 0,1059 та 0,0899; MAPE $\approx$ 47,93% та 45,02%) підтверджують низьку точність і нестабільність таких моделей.

Значно кращі результати демонструють моделі з оптимізатором RMSprop (M2 та M5). Для моделі M2 (ReLU + RMSprop) коефіцієнт $R^2 = 0,869$, тоді як для M5 (tanh + RMSprop) він становить 0,8240. Це свідчить про високий рівень відповідності між прогнозованими та фактичними значеннями. Помилки також суттєво зменшуються (RMSE $\approx$ 0,0532–0,0616; MAE $\approx$ 0,0372–0,0433; MAPE $\approx$ 14,75–17,27%), що вказує на значне покращення якості моделювання порівняно з SGD.

Найкращі результати отримано для моделей з оптимізатором Adam (M3 та M6). Модель M3 (ReLU + Adam) демонструє найвищий коефіцієнт детермінації $R^2=0,9091$, тоді як модель M6 (tanh + Adam) має практично аналогічний результат $R^2=0,9036$. Водночас саме M3 характеризується

мінімальними значеннями помилок ($RMSE = 0,0443$; $MAE = 0,0277$; $MAPE = 10,28\%$), що дозволяє вважати її найбільш точною серед усіх протестованих конфігурацій. Модель M6 демонструє дуже близькі показники ($RMSE = 0,0456$; $MAE = 0,0326$; $MAPE = 13,61\%$), однак дещо поступається за точністю.

Порівняння функцій активації показує, що ReLU у поєднанні з оптимізатором Adam (M3) забезпечує найкращий результат, тоді як tanh (M6) демонструє лише незначно гірші показники. Це дозволяє зробити висновок, що вибір оптимізатора є більш критичним фактором, ніж вибір функції активації.

Порівняльна верифікація нейромережевих конфігурацій засвідчила перевагу моделі M3 з функцією активації ReLU та оптимізатором Adam, яка забезпечила найкраще співвідношення точності прогнозування, стійкості навчання та здатності до узагальнення. Отриманий результат обґрунтовує її використання як прогностичного модуля для оперативної апроксимації вихідного інтегрального індексу моделі IDEM. Завершальним етапом практичної перевірки стало застосування IDEM до фактичних даних підприємств-стейкхолдерів, що дозволило перейти від експериментального моделювання до оцінювання реальних конфігурацій економіко-цифрового управління.

Емпіричну перевірку здійснено на цільовій гетерогенній вибірці з 21 підприємства, які репрезентують різні функціональні позиції у проєктних екосистемах будівництва: виробників і постачальників будівельних матеріалів, генеральних та спеціалізованих підрядників, інфраструктурних і промислових інтеграторів, девелоперські структури, інженерно-енергетичні, реставраційні, виробничо-логістичні та сервісні підприємства. Така побудова вибірки спрямована не на статистичне відтворення генеральної сукупності, а на перевірку здатності моделі IDEM диференціювати управлінські стани за різних бізнес-моделей, масштабів діяльності, структури активів, рівнів цифрової зрілості, екологічного навантаження та організаційної спроможності.

Гетерогенність вибірки відповідає природі проєктів біосферосумісного будівництва, результат яких формується взаємодією функціонально неоднорідних підприємств. Для виробника матеріалів визначальними є ресурсна та вуглецева інтенсивність; для інфраструктурного підрядника – виробнича мобільність, цифровий контроль і екологічна дисципліна; для девелопера – фінансова стійкість, стейкхолдерна координація та управління життєвим циклом проєкту; для спеціалізованого інженерного підприємства – автоматизація, інтеграція даних і технологічна надійність. Тому практична перевірка спрямована не на формування універсального рейтингу «кращих» підприємств, а на виявлення різних конфігурацій їх спроможності виконувати конкретні функції у проєктній екосистемі.

Розгорнуті вихідні та розрахункові дані апробації розробленого науково-методичного інструментарію наведено в додатку Є (табл. Є.1–Є.4), де систематизовано первинні показники досліджуваних підприємств, результати оцінювання функціональних складових Out1–Out5, інтегральні значення IDEM, рівні економіко-цифрового управління та результати багатокритеріального ранжування. Інформаційну базу оцінювання сформовано з фінансової звітності за 2020–2025 рр., ринкового та фінансового скорингу, ESG-профілів, офіційних корпоративних ресурсів, державних реєстрів, даних про сертифікацію, цифрові технології, реалізовані проєкти, екологічні дозволи. Така комбінація джерел дала змогу поєднати кількісні параметри з доказово підтвердженими якісними характеристиками та мінімізувати залежність результату від одного типу інформації.

Розрахункова процедура зберігає дворівневу архітектуру моделі IDEM. На першому рівні двадцять нормованих індикаторів In1–In20 агрегуються у п'ять функціональних підсистем: Out1 – економічна результативність; Out2 – цифрова зрілість управління; Out3 – екологічна та біосферосумісна ефективність; Out4 – стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість; Out5 – організаційно-інноваційна стійкість. Показники прямої та оберненої дії приводяться до інтервалу $[0; 1]$, а слабоструктуровані характеристики

оцінюються за уніфікованою доказово-експертною шкалою. Інтенсивність негативного екологічного впливу перед агрегуванням трансформується в обернену оцінку, за якої більше значення відповідає меншому екологічному навантаженню. Методична послідовність операціоналізації первинних індикаторів узгоджується з розробленою структурою In1–In20 та Out1–Out5.

Для забезпечення відтворюваності практичного оцінювання розрахункову процедуру формалізовано як послідовне перетворення первинних даних у нормовані індикатори, функціональні складові та вихідний інтегральний індекс. Нехай x_{ij} – фактичне значення j -го індикатора для i -го підприємства, L_j і U_j – відповідно нижня та цільова межі його оцінювання. Межі встановлюються на основі нормативних, цільових, бенчмаркових або технологічно обґрунтованих значень, що усуває залежність результату від мінімального і максимального значень конкретної вибірки. Для показників прямої та оберненої дії застосовуються різні напрями нормування; значення, що виходять за встановлені межі, обмежуються інтервалом $[0; 1]$.

$$N_{ij}^d = \frac{x_{ij} - L_j}{U_j - L_j}, \quad N_{ij}^d \in [0; 1]. \quad (5.1)$$

де N_{ij}^d – нормоване значення індикатора прямої дії (індекс d позначає прямий напрям нормування); x_{ij} – фактичне значення індикатора; L_j – нижня межа; U_j – цільове значення. Зростання фактичного значення такого показника за інших рівних умов підвищує оцінку відповідної функціональної складової.

$$N_{ij}^r = \frac{U_j - x_{ij}}{U_j - L_j}, \quad N_{ij}^r \in [0; 1]. \quad (5.2)$$

У формулі оберненого нормування індекс r позначає обернений напрям перетворення. Обернене перетворення застосовується до індикаторів, для яких збільшення первинного значення означає погіршення стану. У такий спосіб

забезпечується єдиний напрям інтерпретації всіх нормованих показників: наближення до 1 відповідає поліпшенню оцінюваної характеристики. Така логіка використовується, зокрема, для інтенсивності негативного екологічного впливу, яка після трансформації відображає зниження екологічного навантаження як зростання нормованої оцінки.

Після нормування чотири індикатори кожного функціонального блоку утворюють відповідну компонентну оцінку. У практичному розрахунку застосовано рівновагове агрегування, яке забезпечує зіставність і відтворюваність компонентних профілів за фактичними даними підприємств, тоді як нелінійна некомпенсаційна взаємодія реалізується на верхньому рівні моделі IDEM. Для k -ї функціональної складової розрахунок здійснюється за формулою:

$$\text{Out}_{ik} = \frac{1}{4} \sum_{j=4k-3}^{4k} \text{In}_{ij}, \quad k = 1, \dots, 5. \quad (5.3)$$

де Out_{ik} – значення k -ї функціональної складової для i -го підприємства; In_{ij} – нормоване значення відповідного первинного індикатора. Відповідно, Out_1 агрегує In_1 – In_4 , Out_2 – In_5 – In_8 , Out_3 – In_9 – In_{12} , Out_4 – In_{13} – In_{16} , Out_5 – In_{17} – In_{20} . Така побудова зберігає змістову автономність п'яти складових і створює компонентний профіль підприємства, який використовується на наступному рівні моделі.

На верхньому рівні сформований компонентний профіль Out_1 – Out_5 не зводиться до арифметичного середнього. Значення складових фазифікуються відповідно до заданих функцій належності, після чого реалізується нечітке виведення за алгоритмом Мамдані. Логічна кон'юнкція передумов правил визначається оператором мінімуму, результати активованих правил об'єднуються оператором максимуму, а перехід до чіткого значення IDEM здійснюється методом центру ваги. Такий порядок зберігає некомпенсаційну

властивість моделі, за якої критично низьке значення окремої складової не може бути механічно нівельоване високими значеннями інших компонентів.

$$IDEM_i = \frac{\int_0^1 y \mu_i^{agg}(y) dy}{\int_0^1 \mu_i^{agg}(y) dy}. \quad (5.4)$$

де $IDEM_i$ – інтегральний індекс i -го підприємства; y – вихідна змінна нечіткої моделі; $\mu_i^{agg}(y)$ – агрегована функція належності вихідного результату, сформована за сукупністю активованих правил Мамдані. Отже, інтегральне значення відображає не механічну суму або середнє Out1–Out5, а результат нелінійної взаємодії компонентів із урахуванням установлених правил і граничних станів.

Окремим елементом діагностичної інтерпретації є визначення складової, яка формує найбільш виражене внутрішнє обмеження компонентного профілю підприємства. Її ідентифікація здійснюється за мінімальним значенням серед Out1–Out5:

$$C_i = \arg \min_{k \in \{1, \dots, 5\}} Out_{ik}. \quad (5.5)$$

де C_i – обмежувальна складова i -го підприємства. Її визначення не означає автоматичного зниження директивного рівня, а використовується для встановлення структурної причини наявного стану та пріоритетного напрямку управлінського впливу. Відповідно, дефіцити Out1, Out2, Out3, Out4 або Out5 трансформуються у різні набори фінансових, цифрових, біосферосумісних, стейкхолдерських або організаційно-інноваційних коригувальних дій.

У додатку Ж (табл. Ж.1–Ж.6) наведено розрахунково-аналітичне забезпечення практичного застосування моделі IDEM: операціоналізацію індикаторів In1–In20, функціональну типологію підприємств, сформовані компонентні профілі Out1–Out5, результати паралельного ранжування за

IDEM, Out1 і Out3, визначені обмежувальні складові та відповідні їм управлінські дії, а також розподіл підприємств за директивними рівнями.

Для управлінської інтерпретації вихідного індексу застосовано директивну шкалу, яка співвідносить його значення з п'ятьма рівнями управлінського стану – випереджальним, стійким, достатнім, перехідним і критичним. Межі шкали не замінюють нечітких функцій належності жорсткою класифікацією, а визначають режим залучення підприємства до проєкту, потребу в додатковому контролі та характер коригувальних заходів (табл. 5.19).

Практичне застосування моделі виявило істотну диференціацію управлінських станів. Значення вихідного інтегрального індексу IDEM змінюються від 0,447 до 0,815; середнє значення становить 0,594, медіана – 0,545. До випереджального рівня віднесено 2 підприємства, або 9,5 % вибірки; до стійкого – 5 підприємств, або 23,8 %; до достатнього – 11 підприємств, або 52,4 %; до перехідного – 3 підприємства, або 14,3 %. Критичних станів не зафіксовано. Такий розподіл підтверджує дискримінаційну здатність моделі та її придатність для розмежування різних конфігурацій проєктної готовності.

Таблиця 5.19

**Директивна шкала інтерпретації інтегрального індексу IDEM та
відповідні управлінські рішення**

Діапазон	Ранг	Рівень	Управлінська інтерпретація
0,80–1,00	I	Випереджальний	Готовність до координаційних функцій і поширення біосферосумісних практик.
0,65–0,79	II	Стійкий	Готовність підтверджено; потрібне локальне посилення найслабшої складової.
0,50–0,64	III	Достатній	Участь доцільна за контрольних показників і погодженої програми розвитку.
0,35–0,49	IV	Перехідний	Потрібне усунення структурних дисбалансів і повторне оцінювання.
0,00–0,34	V	Критичний	Участь обмежується до виконання стабілізаційних, цифрових або екологічних заходів.

Джерело: розроблено автором

Найвищі значення IDEM отримали ТОВ «ПБГ “Ковальська”» – 0,815 та ПрАТ «Івано-Франківськцемент» – 0,809. Їх результат сформовано не домінуванням одного параметра, а поєднанням цифрової зрілості, організаційної стійкості, екологічної результативності та достатньої економічної бази. Водночас модель виявила й обмежувальні складові: для «Ковальської» – Out1, для «Івано-Франківськцементу» – Out3. Отже, навіть випереджальний рівень не означає відсутності управлінських дефіцитів, а характеризує здатність підприємства виконувати інтегровальні або координаційні функції за умови цільового контролю слабшого компонента.

До стійкого рівня увійшли ТОВ «ГК “Автострада”», ПрАТ «ВІЩЕМ», ТОВ «Автомобільна-Південь», ТОВ «СТРУКТУМ» і ТОВ «Ательє де Франс Київ». Порівняння їх компонентних профілів показує, що однаковий директивний рівень може формуватися за принципово різних поєднань Out1–Out5. Це підтверджує необхідність інтерпретувати результат не лише за IDEM, а й за структурою профілю, оскільки для одних підприємств пріоритетним є посилення фінансової складової, для інших – екологічної або цифрової.

Найчисельнішою є група достатнього рівня. Її підприємства мають прийнятний потенціал участі у проєктах, але характеризуються структурними дисбалансами, які мають враховуватися під час розподілу відповідальності. Для ТОВ «Онур Конструкціон Інтернешнл», ТОВ «Ростдорстрой», ПП «Будівельна корпорація “РІЕЛ”», ТОВ «КАДОР ГРУПП», ТОВ «Київська енергетична будівельна компанія» та ТОВ «Моноліт Будсервіс» основним обмеженням є Out1; для ТОВ «ФЕРРОСТРОЙ» і ТОВ «ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ» – Out3; для ТОВ «ЕСТЕТ БУД КОМ», ТОВ «ГРУПА СМАРТ» і ТОВ «ПРОБУДТРАНС» – Out2. Отже, однаковий інтегральний рівень не формує однакової управлінської рекомендації: вона визначається природою дефіциту.

Перехідний рівень встановлено для ТОВ «СТОЛИЦЯ ГРУП», ТОВ «БК “Інтергал-Буд”» і ТОВ «ЕКОБУДОСНОВА». У цих випадках низька економічна результативність обмежує спроможність підтримувати

довгострокове фінансування цифрових, екологічних та організаційних перетворень. Такий стан не означає автоматичного виключення підприємства з проєкту, але потребує зміни режиму залучення: обмеження обсягу відповідальності, установлення контрольних показників, додаткових гарантій, етапного контрагування та повторного оцінювання після реалізації коригувальних заходів.

Середні значення компонентів також виявляють структурну нерівномірність вибірки: Out5 становить 0,684, Out4 – 0,653, Out2 – 0,646, Out3 – 0,598, Out1 – 0,540. Відповідно, Out1 є мінімальною складовою у 12 підприємств, або 57,1 % вибірки, Out3 – у 6 підприємств, або 28,6 %, Out2 – у 3 підприємств, або 14,3 %. Це свідчить, що для більшості підприємств обмеження переходу до вищого рівня економіко-цифрового управління пов'язане не стільки з відсутністю окремих цифрових технологій, скільки з недостатньою економічною спроможністю забезпечувати їх системне впровадження. Водночас майже третина вибірки має дефіцит саме біосферосумісного контуру, що унеможливорює оцінювання проєктної готовності лише через фінансові показники.

Додатковим доказом багатовимірності моделі є розходження фінансового та біосферосумісного рангів. ТОВ «Київська енергетична будівельна компанія» посідає 20-ту позицію за Out1, але 4-ту за Out3; ТОВ «Онур Конструкціон Інтернешнл» – відповідно 15-ту і 5-ту; ТОВ «Ательє де Франс Київ» – 2-гу і 12-ту; ТОВ «ПРОБУДТРАНС» – 9-ту і 21-шу. Таке розходження підтверджує, що фінансова, цифрова та біосферосумісна спроможність є взаємопов'язаними, але незамінними вимірами управлінського стану підприємства. На основі компонентних профілів сформовано діагностико-рекомендаційний механізм, у якому обмежувальна складова безпосередньо пов'язується з напрямом управлінського впливу. Дефіцит Out1 потребує коригування капіталізації, ліквідності, боргового навантаження, прибутковості та грошових потоків; Out2 – розвитку CDE, BIM, ERP, врядування даними, автоматизації та цифрових компетентностей; Out3 –

впровадження LCA, LCC, вуглецевих і енергетичних KPI, ресурсної циклічності, простежуваності матеріалів, відходів і викидів; Out4 – посилення безпеки праці, соціальної відповідальності та комунікації зі стейкхолдерами; Out5 – розвитку адаптивності, інноваційної активності, ризикостійкості та організаційного резервування.

Узагальнені результати практичного застосування моделі наведено в табл. 5.20, у якій для кожного підприємства поєднано його функціональну роль у проєктній екосистемі, компонентний профіль Out1–Out5, вихідний інтегральний індекс IDEM, директивний рівень, загальний, фінансовий і біосферосумісний ранги, обмежувальну складову та пріоритетну управлінську дію. Така побудова переводить оцінювання з площини інтегрального ранжування у площину діагностики проєктної спроможності: значення IDEM характеризує загальний управлінський стан, тоді як компонентний профіль і його мінімальна складова визначають напрям коригувального впливу. Деталізоване ранжування та функціональну типологію підприємств наведено в додатку Ж..

Компонентні профілі підтверджують, що спроможність підприємства-стейкхолдера у проєктах біосферосумісного будівництва визначається не лише значенням IDEM, а конфігурацією економічної результативності, цифрової зрілості, екологічної та біосферосумісної ефективності, стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості й організаційно-інноваційної стійкості. Підприємства з близькими значеннями IDEM можуть мати різні обмеження, що потребує диференціації функціональних ролей, меж відповідальності, контрольних показників і умов залучення до проєкту. Оцінювання пов'язується з конфігуруванням проєктної екосистеми, у якій цифрові, економічні та біосферосумісні параметри учасників співвідносяться з функціями та внеском у досягнення цілей проєкту. Така інтерпретація переводить IDEM із засобу ранжування в інструмент обґрунтування управлінських рішень щодо складу, взаємодії та розвитку підприємств-стейкхолдерів упродовж життєвого циклу біосферосумісного будівництва.

**Результати інтегрального оцінювання та управлінського позиціонування підприємств-стейкхолдерів проєктів
біосферосумісного будівництва за моделлю IDEM**

Підприємство	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5	IDEM	Рівень	Обмежува льна склад ова	Пріоритетна управлінська дія
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ТОВ «ПБГ “Ковальська”»	0,679	0,863	0,745	0,805	0,82	0,815	Випереджальний	Out1	Підвищити віддачу капіталу та фінансову результативність, зберігаючи високі цифрово-екологічні параметри.
ПрАТ «Івано-Франківськцемент»	0,834	0,838	0,768	0,77	0,858	0,809	Випереджальний	Out3	Поглибити декарбонізацію, ресурсоефективність, LCA та контроль вуглецевої інтенсивності.
ТОВ «ГК “Автострада”»	0,689	0,75	0,662	0,775	0,875	0,75	Стійкий	Out3	Посилити LCA/LCC, вуглецеві KPI і цифрову простежуваність екологічних даних.
ПрАТ «ВІПЦЕМ»	0,567	0,805	0,695	0,725	0,768	0,732	Стійкий	Out1	Підвищити прибутковість і грошовий потік зі збереженням траєкторії декарбонізації.
ТОВ «Автомагістраль-Південь»	0,663	0,712	0,762	0,762	0,863	0,694	Стійкий	Out1	Підвищити ROA та якість грошових потоків, уніфікувати ESG-дані у проєктному контурі.
ТОВ «СТРУКТУМ»	0,637	0,75	0,568	0,675	0,775	0,658	Стійкий	Out3	Поглибити LCA/LCC, вуглецевий облік, простежуваність ресурсів і екологічних доказів для енергетичних проєктів.
ТОВ «Ателье де Франс Київ»	0,78	0,588	0,568	0,64	0,74	0,65	Стійкий	Out3	Формалізувати LCA/LCC, облік відходів, простежуваність реставраційних матеріалів та екологічні докази.
ТОВ «Онур Конструкціон Інтернешнл»	0,434	0,7	0,712	0,775	0,812	0,584	Достатній	Out1	Знизити боргове навантаження, підвищити фінансову автономію та ліквідність.
ТОВ «ФЕРРОСТРОЙ»	0,54	0,74	0,495	0,568	0,655	0,581	Достатній	Out3	Посилити екологічний due diligence, облік відходів і викидів, LCA та контроль промислового впливу.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ТОВ «ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ»	0,592	0,588	0,563	0,603	0,668	0,572	Достатній	Out3	Розширити LCA, ресурсну простежуваність та екологічні критерії закупівель.
ПП «Будівельна корпорація “РІЕЛ”»	0,458	0,748	0,575	0,6	0,613	0,545	Достатній	Out1	Посилити фінансову стійкість, контроль грошових потоків і резервування проєктних ресурсів.
ТОВ «ЕСТЕТ БУД КОМ»	0,735	0,453	0,57	0,53	0,56	0,545	Достатній	Out2	Запровадити CDE/BIM/ERP, правила управління даними та розвиток цифрових компетентностей.
ТОВ «ГРУПА СМАРТ»	0,483	0,438	0,475	0,575	0,575	0,532	Достатній	Out2	Розвинути CDE/BIM, врядування даними, автоматизацію та цифрові компетентності.
ТОВ «Ростдорстрой»	0,391	0,588	0,487	0,688	0,637	0,519	Достатній	Out1	Відновити власний капітал, скоротити боргове навантаження та підвищити операційну прибутковість.
ТОВ «ПРОБУДТРАНС»	0,59	0,43	0,443	0,625	0,6	0,518	Достатній	Out2	Цифровізувати документообіг і управління даними; формалізувати облік відходів та екологічну відповідність.
ТОВ «Моноліт Будсервіс»	0,463	0,512	0,557	0,485	0,485	0,516	Достатній	Out1	Знизити боргове навантаження, підвищити фінансову автономію та стабілізувати кадрово-проєктний контур.
ТОВ «КАДОР ГРУПП»	0,42	0,538	0,475	0,6	0,6	0,511	Достатній	Out1	Підвищити фінансову резильєнтність, прибутковість і дисципліну фінансування проєктів.
ТОВ «Київська енергетична будівельна компанія»	0,333	0,863	0,737	0,7	0,725	0,509	Достатній	Out1	Підвищити автономію, ліквідність і керованість боргового навантаження.
ТОВ «СТОЛИЦЯ ГРУП»	0,356	0,63	0,65	0,6	0,668	0,492	Перехідний	Out1	Стабілізувати фінансування, контролювати проєктний cash-flow та інвестиційні зобов'язання.
ТОВ «БК “Інтергал-Буд”»	0,32	0,613	0,558	0,675	0,663	0,49	Перехідний	Out1	Посилити капітальну стійкість, ліквідність і довгострокове фінансування девелоперських проєктів.
ТОВ «ЕКОБУДОСНОВА»	0,38	0,413	0,487	0,545	0,4	0,447	Перехідний	Out1	Капіталізація й відновлення ліквідності як передумова цифрово-екологічної модернізації.

Джерело: розраховано автором

Практична апробація моделі IDEM на функціонально неоднорідній сукупності підприємств підтвердила її здатність відображати не лише загальний рівень економіко-цифрового управління, а й внутрішню конфігурацію спроможності кожного учасника проєктної екосистеми. Отримані результати засвідчили, що економічна результативність, цифрова зрілість, екологічна та біосферосумісна ефективність, стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість і організаційно-інноваційна стійкість не є взаємозамінними характеристиками. Саме тому високі значення одного компонента не можуть бути достатньою підставою для висновку про готовність підприємства до реалізації проєкту, якщо інший компонент формує критичне або істотне обмеження.

Наукове значення отриманого результату полягає у розвитку логіки оцінювання підприємств-стейкхолдерів від одномірного порівняння за фінансовими або технологічними параметрами до багаторівневої діагностики їх функціональної спроможності. Модель IDEM забезпечує поєднання кількісних і кваліметричних параметрів, ураховує нелінійну та некомпенсаційну взаємодію компонентів і дозволяє встановлювати не лише інтегральний стан, а й його структурну причину. У результаті інтегральний індекс використовується не як самодостатня рейтингова величина, а як вихід моделі, який разом із компонентним профілем формує основу для інтерпретації, порівняння та вибору управлінської дії.

Практичне значення полягає у можливості використання моделі для формування складу підприємств-стейкхолдерів конкретного проєкту біосферосумісного будівництва. Компонентний профіль дозволяє визначити, які функції підприємство спроможне виконувати без додаткових обмежень, за яких умов його участь потребує контрактних гарантій або контрольних показників, а за яких – попереднього підвищення фінансової, цифрової, екологічної чи організаційної спроможності. Таким чином, IDEM створює підстави для переходу від статичного відбору контрагентів до керованої

конфігурації проєктної екосистеми за принципом відповідності ролі, ресурсів, даних, ризиків і відповідальності фактичному стану підприємства.

У контексті мети дослідження отримані результати підтверджують доцільність трактування економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами як багатокомпонентної системи, результативність якої визначається не максимальною ефективністю окремого учасника, а узгодженістю спроможностей усієї мережі протягом життєвого циклу проєкту. Саме така логіка відповідає природі біосферосумісного будівництва: економічна життєздатність має підтримувати цифрову простежуваність рішень, цифрове середовище – забезпечувати доказовість екологічних параметрів, а організаційна та стейкхолдерна спроможність – утримувати ці вимоги у процесі міжорганізаційної взаємодії. Тому практичне застосування IDEM формує методичну основу не лише для оцінювання підприємств, а й для обґрунтованого конструювання економіко-цифрової моделі управління проєктною екосистемою біосферосумісного будівництва, у якій результат кожного учасника співвідноситься з його функціональною роллю, відповідальністю та внеском у досягнення економічних, цифрових, екологічних і соціальних цілей проєкту.

Висновки до розділу 5

1. Практична апробація підтвердила працездатність та адекватність запропонованої багаторівневої нечітко-логічної моделі IDEM для комплексного оцінювання ефективності економіко-цифрового управління на будівельних підприємствах.

2. Найвищі значення інтегрального індексу IDEM були отримані для об'єктів із високим рівнем цифрової зрілості, організаційної стійкості та збалансованим розвитком усіх функціональних компонентів системи управління. Практичні результати підтвердили, що накопичення низьких значень окремих функціональних компонентів призводить до суттєвого

зниження інтегрального показника IDEM та обмежує ефективність системи економіко-цифрового управління підприємством.

3. Проведена апробація моделі IDEM підтвердила ефективність використання сценарного моделювання на основі Latin Hypercube Sampling для аналізу поведінки систем економіко-цифрового управління будівельними підприємствами в умовах багатофакторної невизначеності.

4. Отримані результати показали, що інтегральний індекс IDEM характеризується достатньо стабільною поведінкою у сформованому сценарному просторі, а структура моделі демонструє збалансований характер взаємодії між економічними, цифровими, екологічними та організаційними компонентами системи управління.

5. Аналіз чутливості встановив, що найбільший вплив на інтегральний індекс IDEM мають цифрова зрілість управління та екологічна ефективність підприємства, що підтверджує ключову роль цифрової трансформації та біосферосумісного розвитку у сучасній будівельній галузі.

6. Результати статистичного аналізу підтвердили репрезентативність сформованого датасету, що проявляється у вузьких довірчих інтервалах, близьких значеннях середніх та медіан, а також у стабільних характеристиках розподілу агрегованих показників моделі.

7. Отримані результати підтверджують можливість використання моделі IDEM як інструменту підтримки управлінських рішень, оцінювання стійкості системи управління та визначення пріоритетних напрямів розвитку будівельних підприємств у середовищі цифрової економіки та біосферосумісного розвитку.

8. Найвищу якість прогнозування інтегрального індексу IDEM продемонструвала модель M3 (ReLU та Adam), для якої отримано максимальне значення коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,9091$ та мінімальні значення похибок $RMSE = 0,0443$, $MAE = 0,0277$ і $MAPE = 10,28\%$, що свідчить про високу точність апроксимації.

9. Встановлено, що оптимізатор Adam забезпечує найкращу ефективність навчання нейронної мережі незалежно від типу функції активації, демонструючи стабільну збіжність, мінімізацію помилок та високу узагальнюючу здатність моделей.

10. Моделі з оптимізатором SGD (M1 та M4) показали найнижчу точність прогнозування, що підтверджується низькими значеннями R^2 та високими значеннями MAPE понад 45%, що вказує на недостатню ефективність класичного градієнтного спуску для задач прогнозування IDEM.

11. Отримані результати підтверджують доцільність використання гібридної моделі нечіткої логіки та штучних нейронних мереж як ефективного інструменту підтримки прийняття рішень у задачах оцінювання та прогнозування ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами.

ВИСНОВКИ

У дослідженні розв'язано наукову проблему розроблення та обґрунтування концептуально-онтологічних і методологічних засад формування та реалізації економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва. Одержаний науковий результат поєднує еволюційне осмислення управлінських парадигм, онтологічне впорядкування об'єктів і даних, методологію стійкості та резильєнтності, інституціоналізацію ESG-вимог, адаптивну алокацію ризиків, інтегральне оцінювання, сценарне моделювання та інтелектуальне прогнозування. Сформована логіка забезпечує перехід від фрагментарної цифровізації окремих операцій до керованого життєвоциклового контуру, у якому вимоги біосферосумісності, економічні цілі, стейкхолдерські зобов'язання, цифрові дані, ризики та управлінські рішення утворюють взаємопов'язану систему. За результатами виконання поставлених завдань сформульовано такі висновки.

1. На основі історико-логічного, порівняльного та еволюційного аналізу розкрито закономірності парадигмізації управління підприємствами-стейкхолдерами. Встановлено кумулятивну послідовність переходу від індустріально-ресурсної моделі, зорієнтованої на продуктивність ресурсів, до проєктно-процесної, цифрово-інтеграційної, стейкхолдерсько-екосистемної та біосферосумісної економіко-цифрової моделей. Кожний наступний етап розширює об'єкт управління: від виробничих ресурсів, строків і вартості - до даних, міжорганізаційних залежностей, життєвоциклових впливів, екологічних обмежень і спільно створюваної цінності. Науковим результатом стало обґрунтування біосферосумісної моделі як вищого рівня розвитку управлінської парадигми, у межах якого економічна результативність оцінюється разом із цифровою доказовістю, стейкхолдерською легітимністю та впливом на біосферу. Така періодизація дала змогу уточнити поняття «підприємство-стейкхолдер проєкту біосферосумісного будівництва» та «біосферосумісна стейкхолдерсько орієнтована економіко-цифрова модель

управління», визначивши їх теоретичне місце у розвитку економіки й управління підприємствами.

2. Концептуалізовано онтологічну модель економіко-цифрового управління, призначену для усунення семантичної роз'єднаності даних, ролей, процесів і показників у проєктній екосистемі. У структурі моделі виокремлено сім класів керованих сутностей: фізичний актив, цифровий актив, процес, учасник, ресурс, правило та показник. Взаємодію класів організовано через онтологічно-категоріальний, семантико-інформаційний, процесно-інтеграційний, аналітико-прогнозний, економіко-ціннісний контури та контур врядування даними. На відміну від технологічно зорієнтованих схем, у яких інформаційна модель об'єкта або цифровий двійник розглядаються як самодостатній результат цифровізації, запропонована онтологія пов'язує кожний цифровий об'єкт із джерелом даних, відповідальним учасником, правилом використання, управлінською дією та вимірюваним наслідком. Формалізований зв'язок забезпечує простежуваність рішень упродовж життєвого циклу будівельного активу, підтримує сумісність даних різних підприємств-стейкхолдерів і створює підґрунтя для подальшого аналітичного та прогнозного моделювання.

3. Обґрунтовано теоретико-методологічний базис управління екосистемою підприємств-стейкхолдерів як динамічною конфігурацією учасників, ресурсів, даних, знань, ризиків, повноважень і часток спільно створюваної цінності. Стейкхолдерський аналіз доповнено ресурсним, інтересовим, владним, ризиковим і данієвим вимірами, завдяки чому роль учасника визначається не лише рівнем впливу або заінтересованості, а також доступом до критичних ресурсів, володінням даними, спроможністю запобігати ризикам і відповідальністю за життєвоцикловий результат. Встановлено закономірну зміну складу, вагомості та функцій стейкхолдерів на стадіях ініціювання, проєктування, закупівель, будівництва, введення в експлуатацію, використання та завершення життєвого циклу об'єкта. Наукова відмінність полягає у переході від статичної карти заінтересованих сторін до

динамічної моделі управлінської участі. Практичне застосування моделі забезпечує оновлення рольових карт, узгодження внесків, закріплення інформаційної відповідальності, попередження конфліктів інтересів і більш обґрунтований розподіл результатів проєкту.

4. Інтегровано еволюційно-онтологічні та стейкхолдерсько-екосистемні результати у цілісну концептуально-онтологічну платформу формування економіко-цифрових моделей управління. Платформа охоплює шість взаємопов'язаних контурів: еволюційно-онтологічний, стейкхолдерсько-екосистемний, стійкісно-культурний, оцінювальний, інституційно-ризиковий та інструментально-цифровий. Їх взаємодію організовано у замкненому циклі формування цілей, ідентифікації учасників і вимог, накопичення та верифікації даних, оцінювання стану, сценарного прогнозування, вибору управлінської альтернативи, імплементації та повторного контролю. Визначальна характеристика запропонованої платформи полягає у формуванні причинно-логічних зв'язків між інституційними вимогами, цифровими доказами, поведінкою учасників, ризиками, результатами оцінювання та коригувальними управлінськими рішеннями. Платформа утворює методологічний каркас дослідження, забезпечує узгодженість його концептуальних, оцінювальних та інструментальних положень і обґрунтовує необхідність розроблення інтегральної моделі діагностики управлінського стану підприємств-стейкхолдерів мультипроєктної екосистеми.

5. Визначено методологічну конфігурацію стійкості та резильєнтності підприємств-стейкхолдерів, яка поєднує фінансову, операційну, інвестиційно-інноваційну, організаційну, інформаційно-цифрову та екосистемну складові. Резильєнтність формалізовано через послідовність динамічних здатностей «передбачення - реагування - відновлення - трансформація». Уточнене трактування відрізняється від фінансово-стабілізаційної інтерпретації стійкості, оскільки охоплює не лише збереження платоспроможності, а й підтримання функціональної цілісності, перебудову ресурсної та партнерської конфігурації, відновлення керованості проєктних процесів і закріплення

набутого досвіду в оновлених правилах. Самостійним виміром визначено інформаційно-цифрову стійкість, що характеризує доступність, достовірність, захищеність, сумісність і відновлюваність критичних даних. Розроблений конструкт дозволяє локалізувати джерела вразливості до переходу відхилення у кризовий стан, оцінювати спроможність підприємства виконувати проєктні зобов'язання після збурень та обґрунтовувати превентивні й відновлювальні заходи.

6. За результатами порівняльного аналізу міжнародних моделей сформовано структурно-адаптаційну модель інноваційно-екологічної корпоративної культури підприємства-стейкхолдера. Модель узгоджує три рівні: ціннісний, на якому закріплюються орієнтири інноваційності, екологічної відповідальності та людиноцентричності; управлінсько-процедурний, представлений регламентами, повноваженнями, мотивацією, навчанням і цифровою прозорістю; поведінковий, що відображає фактичні дії персоналу та партнерів у проєктних процесах. Структуру культури деталізовано за шістьма складовими: інноваційна орієнтація, екологічна відповідальність, цифрова грамотність, проєктна взаємодія, лідерство і навчання, оцінювання результатів. Адаптаційна логіка поєднує європейську нормативну прозорість, азійську дисципліну виконання та американську ринкову мотивацію з інституційними й ресурсними умовами відновлення України. Розробка дозволяє діагностувати культурну готовність підприємства до біосферосумісних проєктів, виявляти розриви між задекларованими цінностями та реальною поведінкою, формувати адресні програми розвитку компетентностей і мотиваційних механізмів.

7. Операціоналізовано параметри економіко-цифрового управління в індикативно-критеріальній системі, яка інтегрує економічну результативність, цифрову зрілість, екологічну та біосферосумісну ефективність, стейкхолдерно-людиноцентричну орієнтованість й організаційно-інноваційну стійкість. Для кожного індикатора визначено економічний зміст, напрям впливу, одиницю виміру, джерело, власника даних, періодичність оновлення,

спосіб нормування та вагу. Показники розмежовано на результуючі, процесні та доказові, а їх застосування пов'язано з фазами життєвого циклу проєкту. Формування часткових індексів доповнено некомпенсаційними критичними обмеженнями, за якими порушення безпеки, законності, екологічних меж або мінімальної якості даних не може перекриватися високими фінансовими чи цифровими результатами. Відмінність системи полягає у поєднанні вимірювання результативності з перевіркою допустимості управлінської моделі. Біосферосумісність набуває статусу формалізованої умови прийняття рішення, а інтегральний індекс IDEM – функції аналітичного ядра для діагностики дисбалансів і вибору траєкторій розвитку.

8. Інституціоналізовано ESG-принципи та корпоративну соціальну відповідальність у системі управління підприємствами-стейкхолдерами через взаємодію зовнішнього інституційного, внутрішнього корпоративного і цифрового контурів. Встановлено послідовність перетворення нормативної або суспільно значущої вимоги у показник, критичний поріг, джерело даних, закріплену відповідальність, процедуру перевірки та коригувальну дію. Корпоративну соціальну відповідальність розмежовано з ESG: перша формує ціннісно-поведінкову готовність підприємства приймати зобов'язання перед працівниками, громадами, партнерами й довкіллям, другі забезпечують метричну підзвітність, оцінювання суттєвості та зв'язок із фінансовими й інвестиційними рішеннями. Включення ESG-вимог у бюджетування, закупівлі, договори, управління постачальниками, контролінг і цифрові журнали доказів скорочує розрив між формальною відповідністю та фактичними управлінськими практиками.

9. Розроблено механізм адаптивної алокації ризиків між підприємствами-стейкхолдерами, який поєднує інституційно-контрактний, цифрово-аналітичний та екосистемно-поведінковий рівні. Вибір раціонального носія ризикової відповідальності запропоновано здійснювати за контрольованістю джерела, доступом до даних, спроможністю мінімізувати наслідки, правовою визначеністю, економічною мотивацією, життєвоцикловим впливом,

соціальною легітимністю та цифровою перевірюваністю. Розмежовано функції власника даних, відповідального за реагування, виконавця заходу, носія фінансового резерву і суб'єкта зовнішньої комунікації. Механізм передбачає перегляд ролей за появи нових цифрових доказів, зміни умов проєкту або спроможності учасника управляти джерелом ризику. На відміну від статичного договірної перенесення ризику, адаптивна алокація спрямована на закріплення відповідальності за підприємством, здатним попередити подію або мінімізувати її сукупні наслідки. Управлінський результат проявляється у зменшенні конфліктів, підвищенні прозорості резервування та узгодженні ризикових рішень із цілями біосферосумісності.

10. Структуровано функціональну модель цифрового інструментарію реалізації стратегічних цілей проєктів біосферосумісного будівництва. Цифрове ядро моделі утворюють спільне середовище даних та інформаційна модель об'єкта, до яких приєднано цифровий двійник, модулі моніторингу, аналітики, прогнозування, оцінювання життєвого циклу, багатокритеріального вибору та управлінського контролю. Для усунення технологічного детермінізму запропоновано цільово-трасувальний ланцюг «стратегічна ціль - показник - джерело даних - цифровий інструмент - управлінське рішення - перевірка результату». За такою логікою цінність технології визначається не кількістю впроваджених програмних продуктів, а її внеском у досягнення економічних, екологічних, соціальних та проєктних результатів. Функціональна модель забезпечує простежуваність рішень, узгодження даних різних підприємств, раннє виявлення відхилень і цифрове підтвердження виконання життєвоциклових зобов'язань. Практична реалізація моделі створює основу інтеграції стратегічного управління, контролінгу, екологічного моніторингу й управління ризиками в єдиному інформаційному середовищі.

11. Формалізовано багаторівневу нечітко-логічну модель IDEM для інтегрального оцінювання ефективності економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами. Кількісні та кваліметричні вхідні параметри

агреговано у п'ять функціональних підсистем: економічну результативність, цифрову зрілість управління, екологічну та біосферосумісну ефективність, стейкхолдерно-людиноцентричну орієнтованість й організаційно-інноваційну стійкість. Для кожної підсистеми визначено склад входних змінних, лінгвістичні терми, функції належності та бази нечітких правил; верхній рівень реалізує нелінійне агрегування часткових оцінок за алгоритмом Mamdani. На відміну від адитивного індексування, запропонована модель відтворює взаємне підсилення або обмеження компонентів, проміжні стани та вплив критично низьких параметрів. Структура IDEM забезпечує одночасне збереження інтегральності й пояснюваності: підсумкова оцінка супроводжується компонентним профілем і активованими правилами, що дозволяє встановлювати причини сформованого стану та пов'язувати їх із конкретними управлінськими рішеннями.

12. Реалізовано сценарно-аналітичне оцінювання стійкості економіко-цифрового управління на основі латинського гіперкубічного формування вибірки, нечітко-логічного моделювання, описової статистики, перцентильного та кореляційного аналізу, перевірки структурної незалежності компонентів і визначення чутливості IDEM. Сформований сценарний простір охоплює нормований діапазон варіації часткових функціональних індексів Out1–Out5 та дає змогу аналізувати результати IDEM як розподіл можливих управлінських станів підприємства, а не як одиничну детерміновану оцінку. Статистична перевірка підтвердила збалансованість вибірки та відсутність штучної мультиколінеарності, а аналіз чутливості виявив неоднаковий характер впливу функціональних компонентів на підсумковий результат. Одержані закономірності дали змогу визначати межі стійкості, критичні комбінації параметрів, нижні та верхні зони управлінського стану. Сценарний модуль забезпечує стрес-тестування підприємств, оцінювання ризику переходу до несприятливої траєкторії та пріоритизацію коригувальних впливів до фактичного виникнення критичних відхилень.

13. Побудовано та валідовано нейромережевий модуль інтелектуального прогнозування індексу IDEM. Вибірку сформовано на основі сценарних комбінацій функціональних компонентів і результатів нечітко-логічного виведення, завдяки чому багатошаровий перцептрон апроксимує змістовно обґрунтовану нелінійну залежність, а не замінює її статистично непрозорою моделлю. Альтернативні конфігурації порівняно за точністю, швидкістю збіжності, стійкістю навчання, здатністю до узагальнення та характером прогнозних помилок. За результатами порівняльного оцінювання найвищу точність і стійкість прогнозування забезпечила багатошарова нейронна мережа прямого поширення (M3). У її прихованих шарах використано функцію лінійного випрямлення (ReLU), яка активує додатні значення та нівелює від'ємні. Навчання параметрів здійснено методом адаптивної моментної оптимізації (Adam), що динамічно коригує швидкість оновлення ваг з урахуванням поточних і накопичених значень градієнта. Валідація засвідчила відсутність істотного розриву між навчальною та перевіркою вибілками і придатність моделі до оперативного відтворення IDEM для нових комбінацій параметрів. Поєднання нечіткої логіки та нейромережевої апроксимації формує гібридний інтелектуальний контур, у якому перша забезпечує пояснюваність, а друга – швидкість масового сценарного оцінювання та попереднього порівняння управлінських альтернатив.

14. Практична апробація моделі IDEM на емпіричних даних досліджуваних підприємств і сценарно сформованих комбінаціях часткових функціональних індексів підсистем підтвердила її функціональну спроможність, логічну узгодженість бази нечітких правил, чутливість інтегральної оцінки до зміни вхідних параметрів та здатність розпізнавати крайні, проміжні й структурно незбалансовані управлінські стани підприємств. Послідовне оцінювання підсистем Out1–Out5 та їх агрегування дозволило сформувати діагностичний профіль економічної, цифрової, біосферосумісної, стейкхолдерської та організаційно-інноваційної спроможності. Інтерпретаційний механізм охоплює виявлення критичних

відхилень, встановлення причин формування відповідного рівня IDEM і перетворення діагностичних результатів на диференційовані управлінські рішення. Для замовника або інвестора модель забезпечує оцінювання надійності потенційного учасника, для девелопера та генпідрядника – узгодження складу проєктної команди, для підрядника й постачальника – визначення внутрішніх зон розвитку, для експлуатуючої організації – перевірку цифрової сумісності та життєвоциклової готовності. Унаслідок апробації IDEM набув функції діагностико-рекомендаційного механізму, а не лише рейтингового показника.

Сукупність одержаних результатів підтверджує досягнення мети дослідження. Розроблено та науково обґрунтовано концептуально-онтологічні й методологічні засади формування та реалізації економіко-цифрових моделей, сформовано науково-методичний інструментарій інтегрованого оцінювання, сценарного прогнозування та інтелектуальної підтримки управлінських рішень. Теоретичний внесок полягає у розширенні предметного поля економіки та управління підприємствами через поєднання біосферосумісності, стейкхолдерської взаємодії, онтології даних, резильєнтності та інтелектуального моделювання. Методологічний результат представлено цілісною платформою, яка пов'язує вимоги, дані, ризики, показники, прогнози та коригувальні дії в межах життєвого циклу будівельного проєкту. Прикладна цінність визначається можливістю використання IDEM для відбору учасників, діагностики структурних дисбалансів, оцінювання готовності до біосферосумісного виробництва, розподілу відповідальності, стрес-тестування та попереднього моделювання наслідків управлінських альтернатив. Запровадження розробленого інструментарію формує науково-прикладне підґрунтя прозорого, ресурсоефективного, цифрово доказового та екологічно відповідального управління мультипроєктними екосистемами відновлення України й сприяє наближенню будівельної сфери до європейських вимог життєвоциклової, економічної, екологічної та управлінської результативності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Taylor, F. W. (1911). *The principles of scientific management*. Harper & Brothers.
2. Fayol, H. (1917). *Administration industrielle et générale: Prévoyance, organisation, commandement, coordination, contrôle*. H. Dunod et E. Pinat.
3. Freeman, R. E. (1984). *Strategic management: A stakeholder approach*. Pitman.
4. Mitchell, R. K., Agle, B. R., & Wood, D. J. (1997). Toward a theory of stakeholder identification and salience: Defining the principle of who and what really counts. *Academy of Management Review*, 22(4), 853–886. <https://doi.org/10.5465/amr.1997.9711022105>
5. Rowley, T. J. (1997). Moving beyond dyadic ties: A network theory of stakeholder influences. *Academy of Management Review*, 22(4), 887–910. <https://doi.org/10.5465/amr.1997.9711022107>
6. Koskela, L. (1992). *Application of the new production philosophy to construction* (Technical Report No. 72). Center for Integrated Facility Engineering, Stanford University.
7. Ballard, G. (2000). *The last planner system of production control* [Doctoral dissertation, University of Birmingham].
8. Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers* (3rd ed.). Wiley.
9. Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357–375. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>
10. International Organization for Standardization. (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* (ISO Standard No. 19650-1:2018). <https://www.iso.org/standard/68078.html>
11. Гончаренко, Т. А. (2021). BIM-технології як інструментарій для створення інформаційної моделі життєвого циклу об'єкта будівництва. *Управління розвитком складних систем*, (47), 83–88. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.47.83-88>
 12. Verhoef, P. C., Broekhuizen, T., Bart, Y., Bhattacharya, A., Dong, J. Q., Fabian, N., & Haenlein, M. (2021). Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda. *Journal of Business Research*, 122, 889–901. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.09.022>
 13. Zaoui, F., & Souissi, N. (2018). Onto-Digital: An ontology-based model for digital transformation's knowledge. *International Journal of Information Technology and Computer Science*, 10(12), 1–12. <https://doi.org/10.5815/ijitcs.2018.12.01>
 14. United Nations Environment Programme, & Global Alliance for Buildings and Construction. (2025). *Global status report for buildings and construction 2024–2025*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-20242025>
 15. European Commission. (2026). *Level(s): European framework for sustainable buildings*. https://green-forum.ec.europa.eu/green-business/levels_en
 16. Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment. (2020). *Official Journal of the European Union*, L 198, 13–43. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj>
 17. Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 as regards corporate sustainability reporting. (2022). *Official Journal of the European Union*, L 322, 15–80. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj/eng>

18. Кабінет Міністрів України. (2021, 17 лютого). *Про схвалення Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні та затвердження плану заходів з її реалізації* (Розпорядження № 152-р). Верховна Рада України. <https://zakon.rada.gov.ua/go/152-2021-%D1%80>
19. Дубінін, Д. В. (2023). Цифрова трансформація українських будівельних і проєктних підприємств: Перешкоди та можливості. *Управління розвитком складних систем*, (56), 131–137. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.56.131-137>
20. Чумаченко, А. (2025). Особливості інтеграції BIM-технологій на підприємствах будівельної галузі України. *Праці Одеського політехнічного університету*, (1(71)), 178–189. <https://doi.org/10.15276/opu.1.71.2025.20>
21. Бондаренко, Д. В. (2024). Методичний підхід до оцінки цифровізації підприємств будівельної галузі. *Бізнес Інформ*, (6), 93–103. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-6-93-103>
22. Sacks, R., Koskela, L., Dave, B. A., & Owen, R. (2010). Interaction of lean and building information modeling in construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), 968–980. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000203](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000203)
23. Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. Capstone.
24. Kibert, C. J. (2016). *Sustainable construction: Green building design and delivery* (4th ed.). Wiley.
25. Zuo, J., & Zhao, Z.-Y. (2014). Green building research—current status and future agenda: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 271–281. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.021>
26. European Commission. (2023). *Transition pathway for construction: A more resilient, green and digital construction ecosystem*. <https://single-market->

- economy.ec.europa.eu/sectors/construction/construction-transition-pathway_en
27. Drucker, P. F. (1954). *The practice of management*. Harper & Brothers.
 28. Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 83, 121–139. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006>
 29. McKinsey Global Institute. (2017). *Reinventing construction: A route to higher productivity*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution>
 30. World Economic Forum. (2016). *Shaping the future of construction: A breakthrough in mindset and technology*. <https://www.weforum.org/publications/shaping-the-future-of-construction-a-breakthrough-in-mindset-and-technology/>
 31. Беленкова, О. Ю., & Антропов, Ю. В. (2013). Економічна стійкість малих будівельних підприємств України: Оцінка, тенденції, перспективи. *Проблеми економіки*, (3), 51–62.
 32. Chernyshev, D., Ivakhnenko, I., & Klymchuk, M. (2018). The organization of biosphere compatibility construction: Justification of the predictors of building development and the implementation prospects. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 584–586. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14594>
 33. Чернишев, Д. О., Заяць, Є. І., & Ковальов, В. В. (2018). Вимоги до інструментарію організаційно-технологічного супроводу проектів біосферосумісного будівництва. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, (4), 48–55. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.231018.48.310>

- 34.Шпакова, Г. В. (2020). Механізми еколого-економічного стимулювання для активізації переходу до біосферосумісного будівництва. *Управління розвитком складних систем*, (41), 175–180. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.41.175-180>
- 35.World Green Building Council. (2019). *Bringing embodied carbon upfront: Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon*. <https://worldgbc.org/advancing-net-zero/embodied-carbon/>
- 36.Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. acatech – National Academy of Science and Engineering.
- 37.Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- 38.Forcael, E., Ferrari, I., Opazo-Vega, A., & Pulido-Arcas, J. A. (2020). Construction 4.0: A literature review. *Sustainability*, 12(22), 9755. <https://doi.org/10.3390/su12229755>
- 39.Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>
- 40.Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85–113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- 41.Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>

42. Rasmussen, M. H., Lefrançois, M., Schneider, G. F., & Pauwels, P. (2021). BOT: The building topology ontology of the W3C Linked Building Data Group. *Semantic Web*, 12(1), 143–161. <https://doi.org/10.3233/SW-200385>
43. W3C Linked Building Data Community Group. (2026). *Linked Building Data Community Group: About*. https://www.w3.org/community/lbd/wiki/Linked_Building_Data_Community_Group>About
44. Гончаренко, Т. А. (2020). Кластерний метод формування метаданих багатовимірних інформаційних систем для розв’язання задач генерального планування. *Управління розвитком складних систем*, (42), 93–101. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.93-101>
45. Akselrod, R., Shpakov, A., Ryzhakova, G., Honcharenko, T., Chupryna, I., & Shpakova, H. (2022). Integration of data flows of the construction project life cycle to create a digital enterprise based on building information modeling. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 12(1), 40–50. https://doi.org/10.46338/ijetae0122_05
46. Regulation (EU) 2023/2854 of the European Parliament and of the Council of 13 December 2023 on harmonised rules on fair access to and use of data (Data Act). (2023). *Official Journal of the European Union*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/2854/oj/eng>
47. Data Spaces Support Centre. (2025). *Data Spaces Blueprint v1.5*. <https://archive.dssc.eu/space/bv15e/766061169/Data%2BSpaces%2BBlueprint%2Bv1.5%2B-%2BHome>
48. International Data Spaces Association. (2022). *IDS Reference Architecture Model* (Version 4.0). <https://internationaldataspaces.org/offers/reference-architecture/>
49. Schwab, K. (2016). *The fourth industrial revolution*. World Economic Forum.
50. Bolton, A., Butler, L., Dabson, I., Enzer, M., Evans, M., Fenemore, T., Harradence, F., Keaney, E., Kemp, A., Luck, A., Pawsey, N., Saville, S., Schooling, J., Sharp, M., Smith, T., Tennison, J., Whyte, J., Wilson, A., &

- Makri, C. (2018). *The Gemini Principles*. Centre for Digital Built Britain. <https://www.cdbb.cam.ac.uk/DFTG/GeminiPrinciples>
51. ДСТУ ISO 19650-2:2020. (2020). *Організація та оцифрування інформації щодо будівель та споруд включно з будівельним інформаційним моделюванням (BIM). Управління інформацією з використанням будівельного інформаційного моделювання. Частина 2: Етап будівництва (ISO 19650-2:2018, IDT)*. ДП «УкрНДНЦ».
 52. United Nations Environment Programme, & Global Alliance for Buildings and Construction. (2026, May 19). *Global status report for buildings and construction 2025–2026*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-2025-2026>
 53. Donaldson, T., & Preston, L. E. (1995). The stakeholder theory of the corporation: Concepts, evidence, and implications. *Academy of Management Review*, 20(1), 65–91. <https://doi.org/10.5465/amr.1995.9503271992>
 54. Clarkson, M. B. E. (1995). A stakeholder framework for analyzing and evaluating corporate social performance. *Academy of Management Review*, 20(1), 92–117. <https://doi.org/10.5465/amr.1995.9503271994>
 55. Project Management Institute. (2021). *A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK guide) and the standard for project management* (7th ed.).
 56. International Organization for Standardization. (2020). *Project, programme and portfolio management—Guidance on project management* (ISO Standard No. 21502:2020). <https://www.iso.org/standard/74947.html>
 57. Olander, S., & Landin, A. (2005). Evaluation of stakeholder influence in the implementation of construction projects. *International Journal of Project Management*, 23(4), 321–328. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2005.02.002>
 58. Yang, J., Shen, G. Q., Ho, M., Drew, D. S., & Chan, A. P. C. (2009). Exploring critical success factors for stakeholder management in construction

- projects. *Journal of Civil Engineering and Management*, 15(4), 337–348.
<https://doi.org/10.3846/1392-3730.2009.15.337-348>
59. Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU as regards sustainability reporting standards. (2023). *Official Journal of the European Union*. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/2772/oj
60. Arup. (2016). *The circular economy in the built environment*. <https://www.arup.com/globalassets/downloads/insights/circular-economy-in-the-built-environment.pdf>
61. American Institute of Architects. (2007). *Integrated project delivery: A guide*. AIA California Council.
https://assets.aiacontracts.com/ctrzdweb02/zdpdfs/ipd_guide.pdf
62. Pereira, B. M., dos Santos Senna, L. A., & Lindau, L. A. (2018). Stakeholder value network: Modeling key relationships for advancing towards high quality bus transit systems. *Research in Transportation Economics*, 69, 386–393. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2018.09.001>
63. Huang, Y., Wu, L., Chen, J., Lu, H., & Xiang, J. (2022). Impacts of building information modelling (BIM) on communication network of the construction project: A social capital perspective. *PLOS ONE*, 17(10), e0275833. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275833>
64. Global Reporting Initiative. (2025). *GRI Standards*. <https://www.globalreporting.org/standards/>
65. IFRS Foundation. (2023). *IFRS S1 General requirements for disclosure of sustainability-related financial information*. <https://www.ifrs.org/issued-standards/ifrs-sustainability-standards-navigator/ifrs-s1-general-requirements/>
66. IFRS Foundation. (2023). *IFRS S2 Climate-related disclosures*. <https://www.ifrs.org/issued-standards/ifrs-sustainability-standards-navigator/ifrs-s2-climate-related-disclosures/>

67. Sustainability Accounting Standards Board. (2018). *Sustainability accounting standard: Real estate owners, developers & investment trusts*. Sustainability Accounting Standards Board.
68. Bryson, J. M. (2004). What to do when stakeholders matter: Stakeholder identification and analysis techniques. *Public Management Review*, 6(1), 21–53. <https://doi.org/10.1080/14719030410001675722>
69. Bublyk, M., Kowalska-Styczeń, A., Lytvyn, V., & Vysotska, V. (2021). The Ukrainian economy transformation into the circular based on fuzzy-logic cluster analysis. *Energies*, 14(18), 5951. <https://doi.org/10.3390/en14185951>
70. Ковалевська, А. В., & Зеленський, С. В. (2019). Аналіз моделей оцінки стейкхолдерів: Прикладні аспекти формування стратегії сталого розвитку міст України. *Бізнес Інформ*, (9), 299–307. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2019-9-299-307>
71. Chygryn, O., Pimonenko, T., Lyulyov, O., & Goncharova, A. (2018). Green bonds like the incentive instrument for cleaner production at the government and corporate levels: Experience from EU to Ukraine. *Journal of Environmental Management and Tourism*, 9(7(31)), 1443–1456. [https://doi.org/10.14505/jemt.v9.7\(31\).09](https://doi.org/10.14505/jemt.v9.7(31).09)
72. International Organization for Standardization. (2017). ISO 22316:2017 Security and resilience—Organizational resilience—Principles and attributes. <https://www.iso.org/standard/50053.html>
73. Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
74. Duchek, S. (2020). Organizational resilience: A capability-based conceptualization. *Business Research*, 13, 215–246. <https://doi.org/10.1007/s40685-019-0085-7>
75. Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 18(7), 509–533.

- [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199708\)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z)
76. BUILD UP Editorial Team. (2025, April 1). Building the future: How digitalisation and artificial intelligence are reshaping the competitiveness of the construction sector. BUILD UP. <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/digitalisation-and-AI-reshaping-competitiveness-construction-sector>
 77. Meisels, M., Henderson, P., Alami, S., Hardin, K., Welch, S., & Dwivedi, K. (2025, November 13). 2026 engineering and construction industry outlook. Deloitte Insights. <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/engineering-and-construction/engineering-and-construction-industry-outlook.html>
 78. KPMG International. (2026, March 24). Global Construction Survey 2025/2026: The paradox of progress. <https://kpmg.com/xx/en/our-insights/operations/global-construction-survey.html>
 79. Odeh, I., & Tsai, O. (2025, July 2). Is construction future-ready? 3 key insights on the sector's digital transformation. *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/stories/industries-in-depth/construction-sector-digital-transformation/>
 80. Nyqvist, R., Peltokorpi, A., Lavikka, R., & Ainamo, A. (2025). Building the digital age: Management of digital transformation in the construction industry. *Construction Management and Economics*, 43(4), 262–283. <https://doi.org/10.1080/01446193.2024.2416033>
 81. Shahrudin, S., & Husain, S. H. (2024). Navigating paradoxes of identity and leadership in the age of digital transformation of construction industry: Architects' experiences and perceptions. *Construction Management and Economics*, 42(7), 591–609. <https://doi.org/10.1080/01446193.2023.2293901>
 82. Zulu, S. L., & Khosrowshahi, F. (2021). A taxonomy of digital leadership in the construction industry. *Construction Management and Economics*, 39(7), 565–578. <https://doi.org/10.1080/01446193.2021.1930080>

83. Kussl, S., & Wald, A. (2025). The role of construction clients in digital innovation: Insights from scenario analysis. *Construction Management and Economics*, 43(5), 381–404. <https://doi.org/10.1080/01446193.2024.2443658>
84. Liu, Z., & Wang, N. (2026). The effects of emerging digital technologies on construction project resilience: The mediating role of relational governance. *Building Research & Information*, 54(1), 118–134. <https://doi.org/10.1080/09613218.2025.2482961>
85. Sun, C., Zhang, Y., & Luo, Q. (2025). Research on the digital twin application maturity model for construction projects. *Engineering Management Journal*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/10429247.2025.2529086>
86. Prakash, A., & Ambekar, S. (2020). Digital transformation using blockchain technology in the construction industry. *Journal of Information Technology Case and Application Research*, 22(4), 256–278. <https://doi.org/10.1080/15228053.2021.1880245>
87. Izmaylova, E., & Bolila, N. (2018). Models of forecasting the loss of financial strength as a component of the system of economic security of contracting enterprises. *Ways to Improve Construction Efficiency*, (38), 225–233. <https://doi.org/10.32347/2707-501x.2018.38.225-233>
88. Skupskyi, R., Vakhovych, I., Molodid, O., & Antropov, Y. (2020). Theoretical approaches to the selection of anti-crisis potential indicators of a construction enterprise. *Actual Problems of Innovative Economy and Law*, (1), 81–86. <https://doi.org/10.36887/2524-0455-2020-1-14>
89. Ryzhakova, H., Prykhodko, D., Pokolenko, V., Petrukha, N., Chupryna, K., & Khomenko, O. (2022). Update of scientific and methodological approaches to the construction of a multi-criterial system of administration of the activities of enterprises-stakeholders of construction projects. *Spatial Development*, (1), 218–233. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2022.1.218-233>
90. Chupryna, Kh., Chupryna, Iu., Pereli, D., Kushnir, O., Chernenko, M., & Wang, Y. (2024). Economic and managerial imperatives for the development

- of construction development in the context of digital transformation of operational systems of enterprise stakeholders. *Management of Development of Complex Systems*, (60), 209–220. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.209-220>
91. Bielenkova, O., Dubinin, D., & Kalashnikov, D. (2022). Digital transformation of construction and territory development as an imperative for the formation of strategies for construction process participants. *Urban Planning and Territorial Development*, (81), 13–22. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.81.13-22>
92. Кричевська, Ю. В., Рижакова, Г. М., Шпаков, А. В., Поколенко, В. О., & Приходько, Д. О. (2024). Цифрова екосистема в будівельному девелопменті: концептуально-теоретичні аспекти трансформації та управлінські імперативи. *Управління розвитком складних систем*, (60), 174–182. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.174-182>
93. Druzhynin, M., Malykhina, O., Herhi, M., Katsiuba, I., Kyryk, Y., & Yuitao, W. (2025). Basic functionalities of construction organization and management in the concept of digital transformation of enterprises' operational systems. *Building Production*, (78), 22–29. <https://doi.org/10.36750/2524-2555.78.22-29>
94. Державна служба статистики України. (2026). Індекси будівельної продукції. <https://stat.gov.ua/uk/datasets/ekonomichni-pokaznyky-korotkoterminovoyi-statystyky-budivnytstva>
95. Державна служба статистики України. (2025). Економічні показники короткотермінової статистики будівництва. <https://stat.gov.ua/uk/datasets/ekonomichni-pokaznyky-korotkoterminovoyi-statystyky-budivnytstva>
96. Державна служба статистики України. (2025). Капітальні інвестиції (квартальна). <https://stat.gov.ua/uk/datasets/kapitalni-investytsiyi-kvartalna>

97. Державна служба статистики України. (2025). Показники діяльності підприємств. <https://stat.gov.ua/uk/datasets/pokaznyky-diyalnosti-pidpryyemstv>
98. Державна служба статистики України. (2025). Фінансові результати підприємств (річна). <https://stat.gov.ua/uk/datasets/finansovi-rezultaty-pidpryyemstv-richna>
99. Державна служба статистики України. (2025). Показники діяльності підприємств: кількість найманих працівників за видами економічної діяльності. <https://stat.gov.ua/uk/datasets/pokaznyky-diyalnosti-pidpryyemstv>
100. Schein, E. H., & Schein, P. A. (2017). *Organizational culture and leadership* (5th ed.). Wiley.
101. Cameron, K. S., & Quinn, R. E. (2011). *Diagnosing and changing organizational culture: Based on the competing values framework* (3rd ed.). Jossey-Bass.
102. North, D. C. (1990). *Institutions, institutional change and economic performance*. Cambridge University Press.
103. DiMaggio, P. J., & Powell, W. W. (1983). The iron cage revisited: Institutional isomorphism and collective rationality in organizational fields. *American Sociological Review*, 48(2), 147–160. <https://doi.org/10.2307/2095101>
104. Scott, W. R. (2014). *Institutions and organizations: Ideas, interests, and identities* (4th ed.). SAGE Publications.
105. Ketprapakorn, N., & Kantabutra, S. (2022). Toward an organizational theory of sustainability culture. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 638–654. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.020>
106. Putra, A. P., Negara, K. P., & Anwar, M. R. (2024). Organizational culture in construction: An investigation of trends and practices in large-size construction companies. *ASTONJADRO*, 14(1), 97–107. <https://doi.org/10.32832/astonjadro.v14i1.16345>

107. Osman, A. M., Liu, Y., & Wang, Z. (2023). Influence of organizational culture on construction firms' performance: The mediating roles of innovation and marketing capabilities. *Buildings*, 13(2), 308. <https://doi.org/10.3390/buildings13020308>
108. Afzal, F., & Lim, B. (2022). Organizational factors influencing the sustainability performance of construction organizations. *Sustainability*, 14(16), 10449. <https://doi.org/10.3390/su141610449>
109. Rehman, M. A., & Alqahtani, D. A. (2025). The moderating role of organizational culture on barriers and drivers of sustainable construction practices in Saudi Arabia's construction industry: A circular economy perspective. *Buildings*, 15(20), 3663. <https://doi.org/10.3390/buildings15203663>
110. Prasetyo, D. W., Maula, I. S. F., Margaliu, M. F., & Rohman, A. (2025). Green organizational culture, green work engagement, and green human resources management as the antecedents of employee green behavior in Indonesia's state-owned construction industry. *Management Analysis Journal*, 14(1), 112–124. <https://doi.org/10.15294/maj.v14i1.24894>
111. Zhang, Q., Zhu, X., & Lee, M.-J. (2024). Exploring institutional pressures, green innovation, and sustainable performance: Examining the mediated moderation role of entrepreneurial orientation. *Sustainability*, 16(5), 2058. <https://doi.org/10.3390/su16052058>
112. European Commission. (2026, July 3). Corporate sustainability reporting. https://finance.ec.europa.eu/financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting_en
113. European Commission. (2026). Corporate sustainability due diligence. https://commission.europa.eu/topics/business-and-industry/company-law-and-corporate-governance/corporate-sustainability-due-diligence_en
114. World Green Building Council. (2021). Advancing net zero whole life carbon: Offsetting residual emissions from the building and construction

- sector. <https://worldgbc.org/climate-action/advancing-net-zero-whole-life-carbon/>
115. Building and Construction Authority. (2026, March 18). Singapore Green Building Masterplan (SGBMP). <https://www1.bca.gov.sg/sustainability/sgbmp/>
 116. Building and Construction Authority. (2021). Green Mark 2021. <https://www1.bca.gov.sg/sustainability/greenmark/green-mark-2021/>
 117. Japan Sustainable Building Consortium, & Institute for Building Environment and Energy Conservation. (2026). Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency (CASBEE). <https://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/>
 118. The State Council of the People's Republic of China. (2024, March 15). China to advance energy conservation, carbon reduction in buildings. https://english.www.gov.cn/policies/latestreleases/202403/15/content_WS65f44735c6d0868f4e8e520f.html
 119. U.S. Green Building Council. (2025). LEED v5. <https://www.usgbc.org/leed/v5>
 120. U.S. Department of Energy. (2026). Better Buildings Solution Center. <https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/>
 121. Living Planet. (2025, September 21). Введений в дію перший стандарт зеленого будівництва для громадських будинків. <https://livingplanet.org.ua/novuny/vvedenij-v-diyu-pershij-standart-zelenogo-budivnitstva-dlya-gromadskikh-budinkiv>
 122. European Environment Agency. (2024, December 11). Eco-innovation index in Europe. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/eco-innovation-index-8th-eap>
 123. Eurostat. (2026). Circular material use rate (env_ac_cur) [Data set]. https://doi.org/10.2908/env_ac_cur
 124. European Commission. (2026). Circular economy. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en

125. Eurostat. (2026). Circular material use rate by material type (env_ac_curm) [Data set]. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_curm/default/table
126. International Organization for Standardization. (2026, April). ISO 14001:2026 Environmental management systems—Requirements with guidance for use. <https://www.iso.org/standard/14001>
127. European Commission, Directorate-General for Environment. (2024, November 19). EMAS key figures as per November 2024. https://green-forum.ec.europa.eu/publications/emas-key-figures-november-2024_en
128. European Commission. (2026). Construction and demolition waste. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en
129. Eurostat. (2026). ICT and environment by size class of enterprise (isoc_e_envs) [Data set]. https://doi.org/10.2908/isoc_e_envs
130. Eurostat. (2026). ICT and environment by NACE Rev. 2 activity (isoc_e_envn2) [Data set]. https://doi.org/10.2908/isoc_e_envn2
131. Government of the Netherlands. (2026). Circular economy by 2050. <https://www.government.nl/themes/economy/sustainable-economy/circular-economy-by-2050>
132. Government of the Netherlands. (2023, September 27). National Circular Economy Programme 2023–2030. <https://www.government.nl/documents/2023/09/27/national-circular-economy-programme-2023-2030>
133. European Parliament & Council of the European Union. (2024). Directive (EU) 2024/1275 of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/eng>
134. Chernyshev, D., Ivakhnenko, I., Ryzhakova, G., & Predun, K. (2018). Implementation of principles of biospheric compatibility in the practice of

- ecological construction in Ukraine. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.8), 424–427. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27283>
135. Shpakova, H., & Shpakov, A. (2021). Ecological and economic aspects of the transformation of construction enterprises on the basis of biosphere compatibility. *Three Seas Economic Journal*, 2(4), 76–82. <https://doi.org/10.30525/2661-5150/2021-4-13>
 136. Tkachenko, V., Klymchuk, M., & Ivakhnenko, I. (2019). Scientific prediction of the balanced energy saving development strategy of the construction projects. *Virtual Economics*, 2(2), 70–84. [https://doi.org/10.34021/ve.2019.02.02\(5\)](https://doi.org/10.34021/ve.2019.02.02(5))
 137. European Commission. (2026, May 4). Commission Delegated Regulation (EU) 2026/52 of 16 December 2025 amending Annex III to Directive (EU) 2024/1275 as regards the Union framework for the national calculation of life-cycle global warming potential. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2026/52/oj/eng
 138. European Parliament & Council of the European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/3110 of 27 November 2024 laying down harmonised rules for the marketing of construction products and repealing Regulation (EU) No 305/2011. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/3110/oj/eng>
 139. Рижакова, Г. М., Стеценко, С. П., & Лагутіна, З. В. (2013). Альтернативні аналітичні інструменти забезпечення економічної безпеки державного інвестування будівельних проєктів. *Управління розвитком складних систем*, (16), 203–208.
 140. International Organization for Standardization. (2006). ISO 14040:2006 Environmental management–Life cycle assessment–Principles and framework. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
 141. International Organization for Standardization. (2006). ISO 14044:2006 Environmental management–Life cycle assessment–Requirements and guidelines. <https://www.iso.org/standard/38498.html>

142. European Committee for Standardization. (2011). EN 15978:2011 Sustainability of construction works—Assessment of environmental performance of buildings—Calculation method.
143. Trach, R., Pawluk, K., & Lendo-Siwicka, M. (2022). The assessment of the effect of BIM and IPD on construction projects in Ukraine. *International Journal of Construction Management*, 22(10), 1844–1851. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1742636>
144. Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill.
145. Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). Multiple criteria decision analysis: An integrated approach. Kluwer Academic Publishers.
146. BRE Group. (2025). BREEAM New Construction Version 7. <https://breeam.com/breeam-newconstructionv7>
147. Сагайдак М.П., Білецький Я.О. (2024) Управління бізнес-екосистемою в умовах нової нормальності та трансцендентності. *Вчені записки*. 2024. № 36(3). С. 226-241. DOI: http://doi.org/10.33111/vz_kneu.36.24.03.20.138.144. [https://vz.kneu.ua/archive/2024/36\(3\).20](https://vz.kneu.ua/archive/2024/36(3).20).
148. Canada Green Building Council. (2024). Zero Carbon Building—Design Standard (Version 4). https://www.cagbc.org/wp-content/uploads/2024/07/CAGBC_Zero_Carbon_Building%E2%80%93Design_Standard_v4.pdf
149. Сагайдак М.П., Зверев Б.М. (2025) Цифровізація і сталий розвиток як ключові драйвери змін управління організаціями в умовах бізнес-трансцендентності. *Світ фінансів*. 2025. №4(85). С. 8-25. <http://sf.wunu.edu.ua/index.php/sf/issue/view/122>
150. Building and Construction Authority, & Urban Redevelopment Authority. (2026). CORENET X: Overview of CORENET X. <https://info.corenet.gov.sg/overview/about-corenet-x/overview-of-corenet-x>

151. NABERS. (2026). What is NABERS?
<https://www.nabers.gov.au/about/what-nabers>
152. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22 червня 2017 р. № 2118-VIII. (2017). <https://zakon.rada.gov.ua/go/2118-19>
153. Про енергетичну ефективність: Закон України від 21 жовтня 2021 р. № 1818-IX. (2021). <https://zakon.rada.gov.ua/go/1818-20>
154. Про надання будівельної продукції на ринку: Закон України від 2 вересня 2020 р. № 850-IX. (2020). <https://zakon.rada.gov.ua/go/850-20>
155. Chernyshev, D., Ryzhakova, G., Honcharenko, T., Petrenko, H., Chupryna, I., & Reznik, N. (2023). Digital administration of the project based on the concept of smart construction. In B. Alareeni & A. Hamdan (Eds.), *Explore Business, Technology Opportunities and Challenges After the Covid-19 Pandemic* (pp. 1316–1331). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08954-1_114
156. Про публічні закупівлі: Закон України від 25 грудня 2015 р. № 922-VIII. (2015). <https://zakon.rada.gov.ua/go/922-19>
157. Гуцалюк О.М., Бондар Ю.А., Цатурян Р.О. Особливості формування системи реінжинірингу бізнес-процесів підприємств з використанням цифрових технологій. *Економічний вісник Донбасу*. 2023. № 2 (72). С. 40-47. DOI: [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2023-2\(72\)-40-47](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2023-2(72)-40-47)
158. Hutsaliuk O., Tsaturian R., Kalinin O., Gedz M., Buhaieva M., Kramskyi S., Navolokina A. Technological Synergy of Engineering Integrating in Digitalization Economy, Nanotechnology and Intelligent Digital Marketing for Corporate Enterprises in Provisions of their Economic Security. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20 (S8). Pp. 348-366. DOI : <https://doi.org/10.62441/nano-ntp.vi.1295>
159. European Parliament & Council of the European Union. (2026). Directive (EU) 2026/470 of 24 February 2026 amending Directives 2006/43/EC, 2013/34/EU, (EU) 2022/2464 and (EU) 2024/1760 as regards

- certain corporate sustainability reporting requirements and certain corporate sustainability due diligence requirements. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2026/470/oj/eng>
160. European Parliament & Council of the European Union. (2024). Directive (EU) 2024/1760 of 13 June 2024 on corporate sustainability due diligence and amending Directive (EU) 2019/1937 and Regulation (EU) 2023/2859. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1760/oj/eng>
 161. Онофрійчук О. П. Бізнес-моделі управління підприємствами в умовах цифрової трансформації економіки: монографія. Київ: ПП «Сердюк В. Л», 2026. 478 с.
 162. Артюшок, К. А., Гончаров, Ю. В., Артюшок, В. С., Ліщук, Н. В., Онофрійчук, О. П., & Шпотюк, А. М. (2025). Адаптація системи управління еколого-економічними відносинами до умов інноваційної економіки: монографія. Рівне: Ю. Кукса, 2025. 490 с. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17201728>
 163. Коваль, Л. А., Ліщук, Н. В., Козак, С. В., Лук'янчук, Ю. Ф., & Онофрійчук, О. П. (2022). Німецьке економічне диво. *Multidisciplinary Academic Research, Innovation and Results: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference,)Prague, Czech Republic, April 5–8, 2022*). pp. 197–205.
 164. Reznik, N., Gonchar, V., Kalinin, O., Onofriichuk, O., & Datsiuk, P. (2025). Application of resource-saving technologies in the production activities of the food industry in Ukraine. In *The future of work: How technology is transforming jobs and skills. Studies in Systems, Decision and Control* (Vol. 291, pp. 485–497). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87372-0_42
 165. Trach, R., Chupryna, I., Tormosov, R., Leshchynsky, V., Trach, Y., Ryzhakova, G., Ratnikov, D., & Onofriichuk, O. (2026). Decision Support Framework for Post-War Infrastructure Revitalization Using a Hybrid Fuzzy–

- Simulation–ANN Model. *Applied Sciences*, 16(9), 4364. <https://doi.org/10.3390/app16094364>
166. Liou, J. J. H., Liu, P. Y. L., & Huang, S.-W. (2023). Exploring the key barriers to ESG adoption in enterprises. *Systems and Soft Computing*, 5, Article 200066. <https://doi.org/10.1016/j.sasc.2023.200066>
 167. Jónsdóttir, B., Sigurjonsson, T. O., Jóhannsdóttir, L., & Wendt, S. (2022). Barriers to using ESG data for investment decisions. *Sustainability*, 14(9), Article 5157. <https://doi.org/10.3390/su14095157>
 168. Bezerra, R. R. R., Martins, V. W. B., & Macedo, A. N. (2024). Validation of challenges for implementing ESG in the construction industry considering the context of an emerging economy country. *Applied Sciences*, 14(14), Article 6024. <https://doi.org/10.3390/app14146024>
 169. Paridhi, Ritika, Arora, H., Arora, P., & Saini, N. (2024). Unlocking the path to sustainability: A hierarchical model for understanding corporate barriers to ESG reporting adoption. *Journal of Risk and Financial Management*, 17(12), Article 527. <https://doi.org/10.3390/jrfm17120527>
 170. Лагодієнко, О. А., Руденко, С. В., & Лагодієнко, Н. В. (2024). Оцінка відповідності підприємств критеріям ESG: основні виклики. *Економіка та суспільство*, (66), 78–83. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-66-26>
 171. Пушак, Я. Я., Чернух, Д. В., & Трушкіна, Н. В. (2024). Розвиток системи корпоративної соціальної відповідальності українського бізнесу в умовах війни. *Ефективна економіка*, (11). <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.11.22>
 172. Онофрійчук О. П. Інтелектуальне моделювання ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами. *Вісник Східноєвропейського університету економіки і менеджменту*. 2026. № 1 (35). Том 2. С. 470-484. [https://doi.org/10.58253/2078-1628-2026-1-2\(35\)-031](https://doi.org/10.58253/2078-1628-2026-1-2(35)-031)

173. Близнюк, С. В., & Онофрійчук, О. П. (2026). Персоналізований маркетинг у цифровому середовищі: виклики та можливості. *Наукові записки Львівського університету бізнесу та права*, 48, 4–15. <https://doi.org/10.66556/2663-0117.48.blyzniuk-s>
174. Онофрійчук, О. П. (2025). Економіко-цифрові моделі управління будівельними підприємствами. *Академічні візії*, (50). <https://doi.org/10.5281/zenodo.18102355>
175. Коваль, В. В., Онофрійчук, О. П., Капталан, С. М., Гончарова, І. М., & Локаєць, М. М. (2025). Управління розвитком інтелектуально-технологічного капіталу та персоналу підприємства в умовах цифрової трансформації. *Бізнес Інформ*, 9, 160–168. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2025-9-160-168>
176. Гуцалюк О.М., Бондар Ю.А., Шишка І.В., Ковальов Д.Г. Особливості інформаційно-аналітичного забезпечення процесів оптимізації управління на підприємстві в умовах постконфліктної економіки. *Збірник наукових праць Черкаського державного технологічного університету. Серія: Економічні науки*. 2026. Т. 27. Вип. 78 (1). С. 145-156. DOI: [https://doi.org/10.24025/2306-4420.78\(1\).2026.356465](https://doi.org/10.24025/2306-4420.78(1).2026.356465)
177. European Environment Agency. (2025, November 6). Greenhouse gas emissions from energy use in buildings in Europe. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-energy>
178. Eurostat. (2026). Waste statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics
179. Eurostat. (2026). Accidents at work – statistics by economic activity. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_-_statistics_by_economic_activity

180. Eurostat. (2026). Accidents at work – statistics on causes and circumstances. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_-_statistics_on_causes_and_circumstances
181. European Parliament & Council of the European Union. (2014). Directive 2014/95/EU of 22 October 2014 amending Directive 2013/34/EU as regards disclosure of non-financial and diversity information by certain large undertakings and groups. Official Journal of the European Union, L 330, 1–9. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/95/oj/eng>
182. Кабінет Міністрів України. (2024). Про схвалення Стратегії запровадження підприємствами звітності із сталого розвитку: Розпорядження від 18 жовтня 2024 р. № 1015-р. <https://zakon.rada.gov.ua/go/1015-2024-%D1%80>
183. Верховна Рада України. (2022). Про управління відходами: Закон України від 20 червня 2022 р. № 2320-IX. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20>
184. Верховна Рада України. (1992). Про охорону праці: Закон України від 14 жовтня 1992 р. № 2694-XII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>
185. Верховна Рада України. (1999). Про бухгалтерський облік та фінансову звітність в Україні: Закон України від 16 липня 1999 р. № 996-XIV. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/996-14>
186. International Organization for Standardization. (2018). ISO 31000:2018 Risk management–Guidelines. <https://www.iso.org/standard/65694.html>
187. Project Management Institute. (2019). The standard for risk management in portfolios, programs, and projects. Project Management Institute. <https://www.pmi.org/standards/risk-management>

188. International Federation of Consulting Engineers. (2019). The FIDIC golden principles (1st ed.). FIDIC. <https://fidic.org/books/fidic-golden-principles-2019>
189. Patterson, R. (2020, March 27). NEC contracts: Best practice tools for risk allocation and management. NEC Contracts. <https://www.neccontract.com/news/nec-and-risk-management-with-richard-patterson>
190. Li, B., Akintoye, A., Edwards, P. J., & Hardcastle, C. (2005). The allocation of risk in PPP/PFI construction projects in the UK. *International Journal of Project Management*, 23(1), 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.04.006>
191. Zou, P. X. W., Zhang, G., & Wang, J. (2007). Understanding the key risks in construction projects in China. *International Journal of Project Management*, 25(6), 601–614. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.03.001>
192. Taroun, A. (2014). Towards a better modelling and assessment of construction risk: Insights from a literature review. *International Journal of Project Management*, 32(1), 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.03.004>
193. Zhao, X. (2024). Construction risk management research: Intellectual structure and emerging themes. *International Journal of Construction Management*, 24(5), 540–550. <https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2167303>
194. World Bank Group. (2017). Public-private partnerships: Reference guide version 3. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/e64a94b9-b0cb-51a3-b8dd-36bd7944284f>
195. Верховна Рада України. (2019). Про концесію: Закон України від 3 жовтня 2019 р. № 155-IX. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/155-20>

196. Верховна Рада України. (2025). Про публічно-приватне партнерство: Закон України від 19 червня 2025 р. № 4510-IX. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4510-20>
197. Flyvbjerg, B., Holm, M. K. S., & Buhl, S. L. (2002). Underestimating costs in public works projects: Error or lie? *Journal of the American Planning Association*, 68(3), 279–295. <https://doi.org/10.1080/01944360208976273>
198. World Bank, Government of Ukraine, European Commission, & United Nations. (2026). Ukraine fifth rapid damage and needs assessment (RDNA5): February 2022–December 2025. World Bank. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099022026094036395>
199. Національний банк України. (2025). Щомісячні опитування підприємств України: грудень 2025 року. https://bank.gov.ua/admin_uploads/article/Business_survey_m_2025_12.pdf?v=16
200. Рахункова палата. (2026). Звіт про результати аудиту відповідності на тему «Відновлення населених пунктів, які постраждали внаслідок збройної агресії Російської Федерації» (рішення від 7 квітня 2026 р. № 12-1). https://rp.gov.ua/upload-files/Activity/Collegium/2026/12-1_2026/Zvit_12-1_2026.pdf
201. National Institute of Standards and Technology. (2024). The NIST cybersecurity framework (CSF) 2.0 (NIST CSWP 29). <https://doi.org/10.6028/NIST.CSWP.29>
202. National Institute of Standards and Technology. (2024). NIST cybersecurity framework 2.0: Quick-start guide for cybersecurity supply chain risk management (C-SCRM) (NIST SP 1305). <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1305>
203. European Parliament & Council of the European Union. (2022). Directive (EU) 2022/2555 of 14 December 2022 on measures for a high common level of cybersecurity across the Union (NIS 2 Directive). Official

- Journal of the European Union, L 333, 80–152. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2555/oj/eng>
204. Єдина державна електронна система у сфері будівництва. (2024, 25 жовтня). ЄДЕССБ: результати роботи у 3 кварталі 2024 року. <https://e-construction.gov.ua/ua/dessb-rezultati-roboti-u-3-kvartali-2024-roku>
 205. Єдина державна електронна система у сфері будівництва. (2025, 31 жовтня). ЄДЕССБ: результати роботи у III кварталі 2025 року. <https://e-construction.gov.ua/ua/edessb-rezultati-roboti-u-iii-kvartali-2025-roku>
 206. Єдина державна електронна система у сфері будівництва. (2024, 11 липня). 4 роки ЄДЕССБ: результати роботи системи. <https://e-construction.gov.ua/ua/4-roki-edessb-rezultati-roboti-sistemi>
 207. Єдина державна електронна система у сфері будівництва. (2026, 29 квітня). Результати роботи цифрових будівельних сервісів у I кварталі 2026 року. <https://e-construction.gov.ua/ua/rezultati-roboti-cifrovih-budivelnih-servisiv-u-i-kvartali-2026-roku>
 208. Міністерство економіки та довкілля України. (2026, 6 січня). Реформа публічних інвестицій (PIM) у 2025 році: нові стандарти ефективності та прозорості. <https://me.gov.ua/News/Detail/91a7bb20-f385-4b66-8aa9-68d6f400b920?lang=uk-UA>
 209. Чашин, Д. Ю., Рахманін, О. А., & Хіль, Д. В. (2022). Упровадження BIM-технологій як основи для створення комплексних інформаційних моделей в керуванні будівництвом. *Український журнал будівництва та архітектури*, (1), 63–70. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.63.834>
 210. Верховна Рада України. (2021). Проект Закону про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо запровадження будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) на всіх етапах життєвого циклу об'єктів та науково-технічного супроводу об'єктів, удосконалення процедури обстеження об'єктів, прийнятих в

- експлуатацію в установленому законодавством порядку (реєстр. № 6383 від 3 грудня 2021 р.). <https://itd.rada.gov.ua/billinfo/Bills/Card/38508>
211. Eurostat. (2026, January 13). Cloud computing – statistics on the use by enterprises. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Cloud_computing_-_statistics_on_the_use_by_enterprises
 212. Eurostat. (2026). E-business integration. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=E-business_integration
 213. Eurostat. (2025). Use of artificial intelligence in enterprises. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Use_of_artificial_intelligence_in_enterprises
 214. European Commission. (2025, April 2). Analysis of the adoption of Building Information Modelling (BIM) across the EU. BUILD UP. <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/publications/analysis-adoption-bim-across-eu>
 215. International Organization for Standardization. (2024). ISO 16739-1:2024: Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries–Part 1: Data schema. <https://www.iso.org/standard/84123.html>
 216. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
 217. Zadeh, L. A. (2008). Is there a need for fuzzy logic? *Information Sciences*, 178(13), 2751–2779. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.02.012>
 218. Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2)
 219. Ross, T. J. (2010). Fuzzy logic with engineering applications (3rd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119994374>

220. Gajzler, M., & Zima, K. (2017). Evaluation of planned construction projects using fuzzy logic. *International Journal of Civil Engineering*, 15, 641–652. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0177-8>
221. Ryzhakova, G., Honcharenko, T., Predun, K., Petrukha, N., Malykhina, O., & Khomenko, O. (2023). Using of fuzzy logic for risk assessment of construction enterprise management system. *In 2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)* (pp. 208–213). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SIST58284.2023.10223560>
222. Trach, R., Khomenko, O., Trach, Y., Kulikov, O., Druzhynin, M., Kishchak, N., Ryzhakova, G., Petrenko, H., Prykhodko, D., & Obodianska, O. (2023). Application of fuzzy logic and SNA tools to assessment of communication quality between construction project participants. *Sustainability*, 15(7), 5653. <https://doi.org/10.3390/su15075653>
223. De Iuliis, M., Kammouh, O., & Cimellaro, G. P. (2022). Measuring and improving community resilience: A fuzzy logic approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 78, 103118. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103118>
224. McKay, M. D., Beckman, R. J., & Conover, W. J. (1979). A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 21(2), 239–245. <https://doi.org/10.2307/1268522>
225. Stein, M. (1987). Large sample properties of simulations using Latin hypercube sampling. *Technometrics*, 29(2), 143–151. <https://doi.org/10.1080/00401706.1987.10488205>
226. Helton, J. C., & Davis, F. J. (2003). Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 81(1), 23–69. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(03\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(03)00058-9)

227. Shields, M. D., & Zhang, J. (2016). The generalization of Latin hypercube sampling. *Reliability Engineering & System Safety*, 148, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.12.002>
228. Choi, Y., Song, D., Yoon, S., & Koo, J. (2021). Comparison of factorial and Latin hypercube sampling designs for meta-models of building heating and cooling loads. *Energies*, 14(2), 512. <https://doi.org/10.3390/en14020512>
229. Borisut, P., & Nuchitprasittichai, A. (2023). Adaptive Latin hypercube sampling for a surrogate-based optimization with artificial neural network. *Processes*, 11(11), 3232. <https://doi.org/10.3390/pr11113232>
230. Phromphan, P., Suvisuthikasame, J., Kaewmongkol, M., Chanpichitwanich, W., & Slesongsom, S. (2024). A new Latin hypercube sampling with maximum diversity factor for reliability-based design optimization of HLM. *Symmetry*, 16(7), 901. <https://doi.org/10.3390/sym16070901>
231. Iordanis, I., Koukouvinos, C., & Silou, I. (2025). On the efficacy of conditioned and progressive Latin hypercube sampling in supervised machine learning. *Applied Numerical Mathematics*, 208, 256–270. <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2023.12.016>
232. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep learning. MIT Press. <https://www.deeplearningbook.org/>
233. Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323, 533–536. <https://doi.org/10.1038/323533a0>
234. Nair, V., & Hinton, G. E. (2010). Rectified linear units improve restricted Boltzmann machines. *In Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning (ICML 2010)* (pp. 807–814).
235. Kingma, D. P., & Ba, J. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. *In International Conference on Learning Representations (ICLR 2015)*. <https://arxiv.org/abs/1412.6980>

236. Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679–688. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>
237. Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
238. Farrar, C. R., & Worden, K. (2012). Structural health monitoring: A machine learning perspective. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118443118>
239. Cheng, J. C. P., Chen, W., Chen, K., & Wang, Q. (2020). Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms. *Automation in Construction*, 112, 103087. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103087>
240. Taffese, W. Z., & Sistonen, E. (2017). Machine learning for durability and service-life assessment of reinforced concrete structures: Recent advances and future directions. *Automation in Construction*, 77, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.016>
241. Fan, W., Chen, Y., Li, J., Sun, Y., Feng, J., Hassanin, H., & Sareh, P. (2021). Machine learning applied to the design and inspection of reinforced concrete bridges: Resilient methods and emerging applications. *Structures*, 33, 3954–3963. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.110>
242. Moradi, N., Tavana, M. H., Habibi, M. R., Amiri, M., Moradi, M. J., & Farhangi, V. (2022). Predicting the compressive strength of concrete containing binary supplementary cementitious material using machine learning approach. *Materials*, 15(15), 5336. <https://doi.org/10.3390/ma15155336>
243. Phan, V.-T., Tran, V.-L., Nguyen, V.-Q., & Nguyen, D.-D. (2022). Machine learning models for predicting shear strength and identifying failure

- modes of rectangular RC columns. *Buildings*, 12(10), 1493. <https://doi.org/10.3390/buildings12101493>
244. Dziecioł, J., & Sas, W. (2023). Perspective on the application of machine learning algorithms for flow parameter estimation in recycled concrete aggregate. *Materials*, 16(4), 1500. <https://doi.org/10.3390/ma16041500>
245. Bouabdallaoui, Y., Lafhaj, Z., Yim, P., Ducoulombier, L., & Bennadji, B. (2021). Predictive maintenance in building facilities: A machine learning-based approach. *Sensors*, 21(4), 1044. <https://doi.org/10.3390/s21041044>
246. Figueiredo, E., & Brownjohn, J. (2022). Three decades of statistical pattern recognition paradigm for SHM of bridges. *Structural Health Monitoring*, 21(6), 3018–3054. <https://doi.org/10.1177/14759217221075241>
247. Tyvoniuk, V., Trach, R., & Trach, Y. (2025). Integration of probability maps into machine learning models for enhanced crack segmentation in concrete bridges. *Applied Sciences*, 15(6), 3201. <https://doi.org/10.3390/app15063201>
248. Tian, K., Zhu, Z., Mbachu, J., Ghanbaripour, A., & Moorhead, M. (2025). Artificial intelligence in risk management within the realm of construction projects: A bibliometric analysis and systematic literature review. *Journal of Innovation & Knowledge*, 10(3), 100711. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100711>
249. Hutsaliuk O., Bondar Iu., Levchenko O., Butkevych O., Kholodenko A., Melnykov S., Ismailov T. Projection ESG Strategies and Economic Security of an Enterprise Based on Business Intelligence and Tax Compliance. *Reshaping Socially Responsible Business Practices in Small and Medium Enterprises*. USA: IGI Global Scientific Publishing, 2026. Pp. 467-508. DOI: 10.4018/979-8-3373-3805-7.ch015
250. Kalinin, O., Gonchar, V., Abliazova, N., Filipishyna, L., Onofriichuk, O., & Maltsev, M. (2024). Enhancing economic security through digital transformation in investment processes: Theoretical perspectives and

- methodological approaches integrating environmental sustainability. *Natural and Engineering Sciences*, 9(1), 26–45. <https://doi.org/10.28978/nesciences.1469858>
251. Golovchenko, O., Saiensus, M., Sorokoumov, G., Onofriichuk, O., Zubko, O., & Liu, L. (2022). Management of efficiency and competitiveness of enterprises. *Economic Affairs* (New Delhi), 67(3), 317–326. <https://doi.org/10.46852/0424-2513.3.2022.24>
 252. Kalinin, O., & Onofriichuk, O. (2026). Institutional mechanism for shaping the eco-oriented corporate culture of construction enterprises. *Economic Innovations*, 28(2(99)), 66–77. [https://doi.org/10.31520/ei.2026.28.2\(99\).66-77](https://doi.org/10.31520/ei.2026.28.2(99).66-77)
 253. Онофрійчук, О. П. (2026). Онтологічні засади цифрової трансформації будівельної галузі. *Економічний вісник Донбасу*, 2(84), 187–195. [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2026-2\(84\)-187-195](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2026-2(84)-187-195)
 254. Клімова, І. О., Онофрійчук, О. П., & Ткачук, М. В. (2026). Аналіз використання алгоритмів машинного навчання для передбачення купівельних звичок та їх вплив на ефективність маркетингових кампаній. *Актуальні питання економічних наук*, 1, 1–20.
 255. Коваль, В. В., Камінський, О. Є., Редьква, О. З., Онофрійчук, О. П., & Капранова, Л. Г. (2025). Цифрові платформи управління як інструмент трансформації та підвищення економічної безпеки підприємств. *Проблеми економіки*, 3, 176–185. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2025-3-176-185>
 256. Onofriichuk, O. (2025). The formation of resilience in construction enterprises under digital transformation. *Economic Bulletin of Donbas*, 4(82), 115–123. [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2025-4\(82\)-115-123](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2025-4(82)-115-123)
 257. Онофрійчук, О. П. (2025). Управління стейкхолдер-екосистемою підприємства в проєктах біосферосумісного виробництва. *Вісник Східноєвропейського університету економіки і менеджменту*, 2(34), 435–449. [https://doi.org/10.58253/2078-1628-2025-2\(34\)-030](https://doi.org/10.58253/2078-1628-2025-2(34)-030)

258. Онофрійчук, О. П. (2025). Інституційні бар'єри та дисфункції впровадження ESG-принципів у цифрових моделях управління. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*, 348(6), 526–532. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-348-6-76>
259. Онофрійчук, О. П. (2025). Методологічні засади оцінювання ефективності економіко-цифрових моделей управління проєктами біосферосумісного будівництва. *Український журнал прикладної економіки та техніки*, 10(4), 172–176. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-4-33>
260. Онофрійчук, О. П., Авдейчик, О. М., Гребень, Е. І., Бригідир, П. В., Кушнірук, О. Ю., Малеш, С. В., & Веремчук, І. І. (2025). Проблеми розвитку соціально-економічної безпеки в Україні: Виклики та можливості. *Національні інтереси України*, 10(15), 881–893. [https://doi.org/10.52058/3041-1793-2025-10\(15\)-881-893](https://doi.org/10.52058/3041-1793-2025-10(15)-881-893)
261. Онофрійчук, О. П., Авдейчик, О. М., Бригідир, П. В., Кушнірук, О. Ю., Малеш, С. В., & Веремчук, І. І. (2025). Економічна безпека: теоретико-методологічний аналіз. *Суспільство та національні інтереси*, 10(18), 606–615. [https://doi.org/10.52058/3041-1572-2025-10\(18\)-606-615](https://doi.org/10.52058/3041-1572-2025-10(18)-606-615)
262. Онофрійчук, О. П., Ліщук, Н. В., Далюк, Н. Я., Бригідир, П. В., & Соколовський, Д. І. (2024). Теоретичні основи соціально-економічної безпеки. *Актуальні питання у сучасній науці*, 6(24), 131–142. [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-6\(24\)-131-142](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-6(24)-131-142)
263. Онофрійчук, О. П., Яковчук, А., & Сисюк, В. І. (2024). Теоретичні основи економічної безпеки. *Наука і техніка сьогодні*, 2(30), 375–387. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-2\(30\)-375-387](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-2(30)-375-387)
264. Онофрійчук, О. П., Коваль, Л. А., Тимчук, Б. П., Підгрушний, В. А., Гордійчук, О. Ю., & Авдейчик, О. М. (2024). Роль та значення фінансового моніторингу у банківській діяльності. *Національні інтереси України*, 4(4), 361–369. [https://doi.org/10.52058/3041-1793-2024-4\(4\)-361-369](https://doi.org/10.52058/3041-1793-2024-4(4)-361-369)

265. Онофрійчук, О. П., Коваль, Л. А., Яковлєв, В. Ю., Підгрушний, В. А., Семенюк, В. П., & Авдейчик, О. М. (2024). Фінансово-економічна безпека підприємства: проблеми та забезпечення в умовах війни. *Наукові інновації та передові технології*, 11(39), 980–989. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-11\(39\)-980-988](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-11(39)-980-988)
266. Онофрійчук, О. П., Медведєв, І. І., Сокол, О. А., Підгрушний, В. А., Серветник, М. А., & Авдейчик, О. М. (2024). Фінансова безпека держави. *Наукові інновації та передові технології*, 12(40), 765–776. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-12\(40\)-765-776](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-12(40)-765-776)
267. Онофрійчук, О. П., & Близнюк, С. В. (2023). Інтернет-маркетинг в Україні: передумови виникнення, особливості становлення, перспективи розвитку. *Актуальні питання у сучасній науці*, 12(18), 122–131. [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2023-12\(18\)-122-131](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2023-12(18)-122-131)
268. Онофрійчук, О. П., Антонюк, С. І., & Підгрушний, В. А. (2023). Управління фінансовою стійкістю підприємства. *Актуальні питання у сучасній науці*, 12(18), 112–121. [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2023-12\(18\)-112-121](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2023-12(18)-112-121)
269. Онофрійчук, О. П., Близнюк, С. В., & Сисюк, В. І. (2023). Теоретичні аспекти кредитної політики комерційних банків. *Наукові інновації та передові технології*, 14(28), 718–728. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-14\(28\)-718-728](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-14(28)-718-728)
270. Онофрійчук, О. П. (2022). Еволюція парадигми управління будівельними підприємствами. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, 2(49), 346–359. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).346-359](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).346-359)
271. Онофрійчук О. П. Адаптивна алокація ризиків між підприємствами-стейкхолдерами у цифровій екосистемі будівельного проєкту. Міжнародні тенденції та перспективи розвитку в освіті та науці в умовах глобалізації: матеріали Міжнародної науково-практичної

- конференції до 100-річчя академіка Степана Дем'янчука (м. Рівне, 13 листопада 2025 р.). Рівне, 2025. С. 311–314.
272. Reznik, N., Tryhubchenko, A., Gonchar, V., Kalinin, O., Onikiienko, N., & Onofriichuk, O. (2026). The effect of price risk impact on entrepreneurial structures depending on their size. *In Digital horizons: Reimagining business in the tech era: Proceedings of ICBT 2025, Volume 2* (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1570, pp. 347–356). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00329-4_31
 273. Онофрійчук О. П., Васильчук Є. Штучний інтелект у цифровій економіці: ефективність, загрози та виклики. *Інновації партнерської взаємодії освіти, економіки та соціального захисту в умовах інклюзії та прагматичної реабілітації соціуму: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції*. (м. Кам'янець-Подільський, 21-22 травня 2026 р.). С.414-415.
 274. Laktionova, O., Ismailov, T., Kalinin, O., Gonchar, V., & Onofriichuk, O. (2024). Digitalization and management of crypto assets as a source of investment for “green” projects. *E3S Web of Conferences*, 558, Article 01028. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455801028>, eISSN: 2267-1242,
 275. Мекіса, Ю. О., & Онофрійчук, О. П. (2024). Вплив цифрової трансформації на досягнення цілей сталого розвитку в закладах соціальної сфери. *Соціальне забезпечення та соціальна робота в умовах сучасних викликів: Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції*, (15 листопада 2024 року, м. Хмельницький). С. 41–43.
 276. Ліщук, Н. В., Близнюк, С. В., Попик, Ю. І., Авдейчик, О. М., & Онофрійчук, О. П. (2024). Аналіз причин бюджетного дефіциту та його наслідки для національної економіки країни. *Contemporary Challenges of Society and Ways to Overcome Them: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference*, Tallinn, Estonia, January 30–February 2, 2024 P. 54–57.

277. Онофрійчук, О. О. Контурно-шлюзовий підхід до оцінювання ефективності економіко-цифрових моделей управління у проєктах біосферосумісного будівництва. *Актуальні проблеми та перспективи розвитку регіонів: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Рівне, 23 червня 2023 р.). Рівне : РВЦ МЕНУ ім. акад. С. Дем'янчука, 2023. С. 108–111.
278. Бережницька, В. Д., Ільчук, К. В., & Онофрійчук, О. П. (2022). Вплив процесу глобалізації на систему оподаткування як складову інституційного середовища. *Актуальні проблеми економіки, фінансів, обліку та права в XXI столітті: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції*, (Полтава, 15 квітня 2022 року) (с. 21–23). ЦФЕНД.
279. Ліщук Н. В., Онофрійчук О. П., Близнюк С. В., Сторожук В. В., Шеверда Л. Л. (2022). Валютне регулювання експортних та імпорتنих операцій суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності. *Actual Priorities of Modern Science, Education and Practice: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference*, (Paris, France, March 29–April 1, 2022). pp. 200–205.
280. Ackoff, R. L. (1994). The democratic corporation: A radical prescription for recreating corporate America and rediscovering success. *Oxford University Press*.
281. Moore, J. F. (1993). Predators and prey: A new ecology of competition. *Harvard Business Review*, 71(3), 75–86. <https://hbr.org/1993/05/predators-and-prey-a-new-ecology-of-competition>
282. Adner, R. (2017). Ecosystem as structure: An actionable construct for strategy. *Journal of Management*, 43(1), 39–58. <https://doi.org/10.1177/0149206316678451>
283. Brynjolfsson, E., & Hitt, L. M. (2000). Beyond computation: Information technology, organizational transformation and business

- performance. *Journal of Economic Perspectives*, 14(4), 23–48.
<https://doi.org/10.1257/jep.14.4.23>
284. Davenport, T. H., & Ronanki, R. (2018). Artificial intelligence for the real world. *Harvard Business Review*, 96(1), 108–116.
<https://hbr.org/2018/01/artificial-intelligence-for-the-real-world>
285. Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2014). How smart, connected products are transforming competition. *Harvard Business Review*, 92(11), 64–88.
<https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition>
286. Згалат-Лозинська, Л., Дацій, О., & Величко, А. (2024). Фінансово-кредитні інструменти як ключовий чинник розвитку інвестиційної діяльності у будівництві. *Економіка та суспільство*, (70).
<https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-70-158>
287. Божанова, В. Ю., Кононова, О. Є., & Шпатакова, О. Л. (2019). Методологія формування екологічної стратегії будівельного підприємства. *Інвестиції: практика та досвід*, (18), 14–21.
<https://doi.org/10.32702/2306-6814.2019.18.14>
288. Згалат-Лозинська, Л. О. (2020). Концепція інноваційного розвитку будівельної галузі в умовах пандемії та економічної кризи. *Економічний простір*, (157), 27–31. <https://doi.org/10.32782/2224-6282/157-5>
289. Гуцалюк О.М., Бондар Ю.А., Аблязова Н.Р., Манькута Я.М. Інноваційно-інвестиційні, фінансові та цифрові драйвери управління підприємствами стейкхолдерами проєктів біосферосумісного виробництва в екосистемі соціального підприємництва великомасштабних економіко-виробничих груп і корпоративно інтегрованих структур бізнесу. *Вісник Східноєвропейського університету економіки і менеджменту*. 2026. № 1 (35). С. 156-171.
 DOI: [https://doi.org/10.58253/2078-1628-2026-1-2\(35\)-011](https://doi.org/10.58253/2078-1628-2026-1-2(35)-011)
290. Гуцалюк О.М., Манькута Я.М., Захарова І.В., Терновий Є.І. Технології інформаційного забезпечення і корпоративної безпеки в

- інтегрованих екосистемі економіко-правового управління підприємствами та ІТ-кластерами. Економічний вісник Донбасу. 2026. № 2 (84).
291. Поповиченко, І. В., & Андрійчук, А. С. (2025). Аналіз результатів господарської діяльності бізнес-структури в сучасних реаліях економіки України. Вісник Одеського національного університету. Економіка, 30(1(103)), 41–47. <https://doi.org/10.32782/2304-0920/1-103-7>
 292. Гуцалюк О.М., Бондар Ю.А., Шишка І.В., Ковальов Д.Г. Особливості інформаційно-аналітичного забезпечення процесів оптимізації управління на підприємстві в умовах постконфліктної економіки. *Збірник наукових праць Черкаського державного технологічного університету. Серія: Економічні науки*. 2026. Т. 27. Вип. 78 (1). С. 145-156. DOI: [https://doi.org/10.24025/2306-4420.78\(1\).2026.356465](https://doi.org/10.24025/2306-4420.78(1).2026.356465)
 293. Novykova, I., & Leshchynskyi, V. (2024). Development of a classification of strategies for operating activities of an industrial enterprise. *Baltic Journal of Legal and Social Sciences*, 94-105. <https://doi.org/10.30525/2592-8813-2024-spec-10>
 294. Сагайдак М.П., Гончар В.В., Колос І.В., Теплюк М.А. Вплив цифрової трансформації на розвиток соціально відповідальних бізнес-екосистем. *Європейський науковий журнал Економічних та Фінансових інновацій*. 2025. 3(17). С. 595-607. DOI: <https://doi.org/10.32750//2025-0352>. URL: <https://journal.eae.com.ua/index.php/journal/article/view/599>
 295. Поповиченко, І. В., Омеляненко, М. В., Саньков, П. М., & Ткач, Н. О. (2022). Структурованість містобудівного управління територіями післявоєнного відновлення України. *Editorial board*, 96.
 296. YouControl. (2026). ТОВ «ПБГ “Ковальська”» (код ЄДРПОУ 35142753). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/35142753/
 297. Промислово-будівельна група «Ковальська». (2026). Офіційний сайт. <https://kovalska.com/>

298. YouControl. (2026). ПрАТ «Івано-Франківськцемент» (код ЄДРПОУ 00292988).
https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/00292988/
299. ПрАТ «Івано-Франківськцемент». (2026). Офіційний сайт.
<https://www.ifcem.if.ua/>
300. YouControl. (2026). ТОВ «ГК «Автострада»» (код ЄДРПОУ 40148165). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/40148165/
301. Autostrada. (2026). Офіційний сайт. <https://autostrada.ua/>
302. YouControl. (2026). ПрАТ «ВІПЦЕМ» (код ЄДРПОУ 04880386).
https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/04880386/
303. ПрАТ «ВІПЦЕМ». (2026). Офіційний сайт. <https://vipcem.com.ua/>
304. YouControl. (2026). ТОВ «Автомагістраль-Південь» (код ЄДРПОУ 34252469). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/34252469/
305. ТОВ «Автомагістраль-Південь». (2026). Офіційний сайт.
<https://automagistral.com.ua/>
306. YouControl. (2026). ТОВ «СТРУКТУМ» (код ЄДРПОУ 38186327).
https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/38186327/
307. ТОВ «СТРУКТУМ». (2026). Офіційний сайт. <https://structum.ua/>
308. YouControl. (2026). ТОВ «Ательє де Франс Київ» (код ЄДРПОУ 42862967). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/42862967/
309. Groupe Ateliers de France. (2026). Офіційний сайт групи.
<https://ateliersdefrance.com/>
310. YouControl. (2026). ТОВ «Онур Конструкціон Інтернешнл» (код ЄДРПОУ 32851616).
https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/32851616/
311. ONUR Group. (2026). Україна. Офіційний сайт.
<https://www.onurgroup.com/uk/ulke/ua/>
312. YouControl. (2026). ТОВ «ФЕРРОСТРОЙ» (код ЄДРПОУ 35107305). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/35107305/

313. ТОВ «ФЕРРОСТРОЙ». (2026). Офіційний сайт. <https://www.ferrostroy.ua/>
314. YouControl. (2026). ТОВ «ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ» (код ЄДРПОУ 41549345). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/41549345/
315. LEV Development. (2026). Офіційний сайт. <https://lev-development.com.ua/>
316. YouControl. (2026). ПП «Будівельна корпорація “РІЕЛ”» (код ЄДРПОУ 40273888). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/40273888/
317. РІЕЛ. (2026). Офіційний сайт. <https://riel.ua/>
318. YouControl. (2026). ТОВ «ЕСТЕТ БУД КОМ» (код ЄДРПОУ 44034772). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/44034772/
319. YouControl. (2026). ТОВ «ГРУПА СМАРТ» (код ЄДРПОУ 41141967). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/41141967/
320. Група Смарт. (2026). Офіційний сайт. <https://grupasmart.com.ua/>
321. YouControl. (2026). ТОВ «Ростдорстрой» (код ЄДРПОУ 33658865). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/33658865/
322. RDS. (2026). Офіційний сайт. <https://rds.org.ua/>
323. YouControl. (2026). ТОВ «ПРОБУДТРАНС» (код ЄДРПОУ 45129482). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/45129482/
324. YouControl. (2026). ТОВ «Моноліт Будсервіс» (код ЄДРПОУ 39778632). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/39778632/
325. ТОВ «Моноліт Будсервіс». (2026). Офіційний сайт. <https://mbs.kiev.ua/>
326. YouControl. (2026). ТОВ «КАДОР ГРУПП» (код ЄДРПОУ 37136893). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/37136893/
327. KADORR Group. (2026). Офіційний сайт. <https://kadorrgroup.com/>
328. YouControl. (2026). ТОВ «Київська енергетична будівельна компанія» (код ЄДРПОУ 32878418). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/32878418/

- 329. Київська енергетична будівельна компанія. (2026). Офіційний сайт. <https://www.kebk.com.ua/>
- 330. YouControl. (2026). ТОВ «СТОЛИЦЯ ГРУП» (код ЄДРПОУ 36175203). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/36175203/
- 331. Stolitsa Group. (2026). Офіційний сайт. <https://stolitsagroup.com/>
- 332. YouControl. (2026). ТОВ «БК «Інтергал-Буд»» (код ЄДРПОУ 34692645). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/34692645/
- 333. Інтергал-Буд. (2026). Офіційний сайт. <https://intergal-bud.com.ua/>
- 334. YouControl. (2026). ТОВ «ЕКОБУДОСНОВА» (код ЄДРПОУ 43265431). https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/43265431/

Стратегічні та операційні орієнтири концептуально-онтологічної платформи

Стратегічний орієнтир	Операційні завдання	Методологічний та управлінський результат
1. Онтологічна трансформація об'єкта управління	1.1. Уточнення змісту економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами. 1.2. Перехід від виробничо-ресурсної до життєвоциклової логіки управління. 1.3. Формалізація класів керованих сутностей, їх атрибутів і семантичних зв'язків. 1.4. Формування понятійно-категоріального базису біосферосумісного будівництва.	Оновлений об'єкт управління; онтологічна структура керованих сутностей; єдиний понятійно-категоріальний базис; логіка переходу до відкритої економіко-цифрової системи.
2. Інституційне впорядкування економіко-цифрового управління	2.1. Формалізація ESG-принципів і нормативних вимог. 2.2. Встановлення правил, стандартів та регламентів взаємодії. 2.3. Розподіл відповідальності між учасниками та власниками даних. 2.4. Формування цифрової доказовості, вимог до якості даних і механізмів реагування на ризики.	Інституційно визначені правила управління; нормативно-ризикові обмеження; закріплена відповідальність; цифрові докази відповідності; механізми адаптивного реагування.
3. Формування стейкхолдерсько-екосистемної архітектури управління	3.1. Ідентифікація та класифікація підприємств-стейкхолдерів за фазами життєвого циклу. 3.2. Формування цифрового реєстру учасників. 3.3. Побудова матриць ролей, взаємодії, відповідальності та внесків. 3.4. Узгодження інтересів і механізмів спільного прийняття рішень.	Екосистемна конфігурація учасників; цифровий реєстр; матриці ролей і взаємодії; механізм узгодження інтересів, відповідальності та спільно створюваної цінності.

4. Забезпечення організаційної стійкості та культури цифрової трансформації	4.1. Розвиток цифрових і управлінських компетентностей персоналу. 4.2. Формування культури даних та інноваційно-екологічних цінностей. 4.3. Розвиток механізмів управління змінами й подолання організаційного опору. 4.4. Інтеграція ESG-відповідальності, адаптивності та резильєнтності в управлінські практики.	Організаційна готовність до змін; цифрові компетентності; культура даних; механізми передбачення, реагування, відновлення й трансформації; підвищення резильєнтності підприємства.
5. Побудова економіко-діагностичної системи оцінювання та прогнозування	5.1. Формування системи показників In1–In20 за п'ятьма функціональними складовими. 5.2. Нормування та формування часткових індексів функціональних складових. 5.3. Побудова нечітко-логічної моделі IDEM та системи правил Мамдані. 5.4. Реалізація аналізу чутливості, сценарного моделювання та нейромережевої апроксимації.	Компонентний профіль підприємства; модель IDEM; директивний рівень управлінського стану; виявлення структурних дисбалансів і обмежувальної складової; сценарно-прогностична підтримка управлінських рішень.
6. Розвиток інструментально-цифрової основи управління	6.1. Формування цифрової архітектури управління та спільного середовища даних. 6.2. Інтеграція BIM, CDE, ERP, CRM, GIS, IoT, Digital Twin, Big Data та AI. 6.3. Автоматизація моніторингу, контролю й аналітичного супроводу життєвого циклу. 6.4. Забезпечення цифрової простежуваності та підтримки управлінських рішень.	Інтегроване цифрове середовище; наскрізна циркуляція та простежуваність даних; автоматизований моніторинг; аналітична підтримка; цифрова доказовість і верифікація управлінських рішень.

Джерело: розроблено автором.

Додаток Б
Таблиця Б.1

Тенденції трансформації передумов економіко-цифрового управління будівельними підприємствами в умовах біосферосумісного розвитку у 2021–2025 рр.

№	Показник	Одиниця	2021	2022	2023	2024	2025	Темп змін, %	Темп змін абсол.
Економічний вимір									
1	Реальна зміна ВВП України	% до попереднього року	3,4	–28,8	5,3	2,9	1,8	–47,1	–1,6
2	Обсяг виконаних будівельних робіт	млрд грн	258,1	113,8	162,7	204,7	258,2	0	0,1
3	Індекс будівельної продукції	% до попереднього року	106,8	35,2	122,6	117,8	111,3	4,2	4,5
4	Індекс цін на будівельно-монтажні роботи	%	120,4	129,1	110,5	107	105,6	–12,3	–14,8
Соціальний вимір									
5	Введення житла в експлуатацію	млн м ²	11,4	7,11	7,38	9,76	9,6	–15,8	–1,8
6	Квартири та індивідуальні житлові будинки, введені в експлуатацію	тис. одиниць	151,7	92,6	89,3	118,5	117,6	–22,5	–34,1
7	Частка житлового фонду, пошкодженого або зруйнованого внаслідок війни	% житлового фонду	–	–	10	13	14,0**	40	4

Цифровий вимір									
8	Частка підприємств, що мають власну інтернет-сторінку	% підприємств	н/д	35,3	37,4	38,2	38,7	9,6*	3,4*
9	Частка підприємств, що мають мобільний застосунок для клієнтів	% підприємств	н/д	1,6	2,8	3,2	3,9	143,8*	2,3*
10	Частка підприємств, що використовують соціальні мережі	% підприємств	н/д	29,1	29,8	30	29,3	0,7*	0,2*
11	Частка підприємств, що використовують системи управління взаємовідносинами з клієнтами	% підприємств	н/д	3	6,8	7,4	8,7	190,0*	5,7*
12	Кількість підприємств, які здійснювали електронну торгівлю	одиниць	н/д	1953	2478	3033	3173	62,5*	1220*
13	Обсяг реалізованої продукції, отриманий від електронної торгівлі	млрд грн	н/д	239,2	547,59	657,45	703,47	194,1*	464,27*
14	Середній обсяг електронної торгівлі на одне підприємство, що здійснювало електронні продажі	млн грн / підприємство	н/д	122,48	220,98	216,77	221,71	81,0*	99,23*
15	Індекс цифрової управлінської інтегрованості підприємств	пунктів	н/д	19,39	21,71	22,28	22,84	17,8*	3,46*
Інтеграційно-інституційний вимір									
16	Залучені Україною гранти, пільгові кредити та гарантії з 2022 р., сукупно	млрд дол. США	0*	31,1	73,6	115,3	161	н/д	161

17	Індекс сприйняття корупції	балів, 0–100	32	33	36	35	36	12,5	4
18	Індекс верховенства права Проекту світового правосуддя	індекс, 0–1	0,51	0,5	0,49	0,49	0,48	–5,9	–0,03
19	Індекс цифрово-інституційної готовності управління біосферосумісним будівництвом	пунктів	59,05	62,51	63,2	63,03	71,41	20,9	12,36
20	Індекс регуляторно-даннєвої спроможності економіко- цифрового управління	пунктів	47,04	54,23	57,82	55,97	50,21	6,7	3,17
21	Індекс збалансованості цифрово- інституційного середовища	пунктів	53,84	52,83	63,79	60,71	35,56	–34,0	–18,28
22	Глобальний інноваційний індекс: складова «інституції»	місце у рейтингу, менше = краще	91	97	100	107	108	18,7***	17***
Резильєнтний вимір									
23	Кумулятивні потреби відновлення та реконструкції України за міжнародною оцінкою збитків і потреб	млрд дол. США	0*	349	411	486	587,7**	н/д	587,7
24	Кумулятивні прямі збитки за міжнародною оцінкою збитків і потреб	млрд дол. США	0*	97,4	135	152	195,1**	н/д	195,1

Порівняльний аналіз міжнародного інструментарію управління біосферосумісним будівництвом Європейський Союз і національні моделі держав – членів ЄС

Європейська модель відрізняється переходом від добровільної оцінки до нормативно забезпеченої системи життєвого циклу. Level(s) виконує функцію спільної мови: шість макроцілей охоплюють вуглецеві викиди та енергію, ресурсоефективність і циркулярність матеріалів, воду, здоров'я і комфорт, адаптацію до зміни клімату та вартість життєвого циклу [178]. Методологічна цінність Level(s) полягає в узгодженні показників і рівнів деталізації, а не в присвоєнні будівлі єдиного рейтингу. Це дозволяє використовувати рамку в публічних закупівлях, інвестиційному аналізі та національних системах сертифікації.

Директива (ЄС) 2024/1275 про енергетичні характеристики будівель розширила предмет регулювання від операційного енергоспоживання до вуглецевого впливу життєвого циклу. Для нових будівель передбачено розрахунок і розкриття life-cycle GWP у сертифікаті енергетичної ефективності, а Делегований регламент (ЄС) 2026/52 встановив гармонізовану рамку національних методик [179; 180]. Унаслідок цього вуглецевий показник стає не лише інженерною характеристикою, а елементом регуляторного дозволу, ринкової інформації та управління портфелем активів.

Таксономія ЄС формує фінансовий контур оцінювання. Вона встановлює критерії істотного внеску, принцип «не завдавати значної шкоди», мінімальні соціальні гарантії та вимоги до доказів [181; 182]. Для будівельного проєкту це означає необхідність пов'язати енергетичні, кліматичні, водні, циркулярні та екосистемні характеристики з інвестиційним рішенням і нефінансовою звітністю. Регламент (ЄС) 2024/3110 про будівельну продукцію додає цифровий продуктовий паспорт, відкриті та машинозчитувані формати, інтероперабельність із BIM і тривале збереження даних [183]. Отже, європейська архітектура поєднує методiku, поріг, фінансовий стимул і цифрову доказовість.

Німецька система BNB демонструє, як загальноєвропейські стандарти можуть бути інституціоналізовані на рівні державного замовника. Вона оцінює екологічну, економічну, соціокультурну і функціональну якість, технічну якість, процеси та характеристики місця. Розрахунки спираються на ÖKOBAUDAT і програмні засоби eLCA, а знак якості QNG використовується у зв'язку з програмами пільгового фінансування [185–187]. Така конструкція мінімізує розрив між сертифікацією і фінансуванням: показник має економічний наслідок для замовника та девелопера.

У Франції, Нідерландах, Данії та інших державах ЄС спостерігається аналогічна тенденція: запровадження національних порогів embodied carbon, обов'язкового LCA для окремих типів будівель, використання EPD і національних баз даних. Відмінності стосуються функціональної одиниці, строку розрахунку, охоплених модулів та темпів зниження граничних значень. Для України принциповим є не механічне копіювання одного порога, а створення національної системи даних і бенчмарків, яка забезпечить поступове посилення вимог без втрати доступності будівництва.

Велика Британія та США: управління вуглецем через стандарти, закупівлі і ринкові рейтинги

Британська практика поєднує добровільну систему BREEAM з нормативними вимогами до енергоефективності, локальними вимогами до whole-life carbon та державними

закупівлями. BREEAM оцінює управління, здоров'я і добробут, енергію, транспорт, воду, матеріали, відходи, землекористування та екологію, забруднення й інновації [188]. Перевагою системи є розвинена процедура незалежної оцінки; обмеженням – можливість балової компенсації, коли високий результат за одними категоріями частково маскує слабкість за іншими.

У 2026 р. уряд Великої Британії оприлюднив керівництво з управління вуглецем життєвого циклу, узгоджене з PAS 2080:2023 і процедурою обґрунтування державних інвестицій [189]. Procurement Policy Note 06/21 вимагає від постачальників великих державних контрактів планів скорочення викидів, а лондонське керівництво встановлює процедуру whole-life carbon assessment для значних проєктів [190; 191]. Суттєвою є зміна об'єкта контролю: оцінюється не лише будівля, а спроможність ланцюга постачання керувати викидами та підтверджувати прогрес.

У США відсутня єдина федеральна система, еквівалентна нормативній архітектурі ЄС, однак сильний вплив мають LEED, ASHRAE 189.1, вимоги GSA і програми Buy Clean. LEED v5 структурує оцінювання навколо декарбонізації, якості життя та збереження і відновлення екосистем; підвищено значення операційного й втіленого вуглецю, холодоагентів, транспортних викидів, резильєнтності та справедливості [192]. GSA використовує whole-building LCA, EPD, EC3 та вимоги до матеріалів із низьким втіленим вуглецем, а стандарт P100 поширює на федеральні будівлі вимоги електрифікації, повторного використання води, grid-interactive режимів і декарбонізації будівельних процесів [193; 194].

Американський підхід є ринково-інноваційним: держава створює попит на низьковуглецеві матеріали, а цифрові інструменти забезпечують порівняння EPD і вибір постачальників. Його обмеженням є неоднорідність вимог між штатами й типами замовників. Проте для України цінним є механізм Buy Clean, за якого екологічна декларація і порогове значення GWP стають умовою доступу до державного замовлення, а не факультативною характеристикою.

Канада, Японія, Сінгапур та Австралія: поєднання проєктного і фактичного оцінювання

Канадська система Zero Carbon Building розділяє проєктну та експлуатаційну сертифікацію. ZCB-Design v4 оцінює прогнозовані операційні викиди, втілений вуглець, холодоагенти, герметичність і вплив на електричну мережу; ZCB-Performance передбачає щорічне підтвердження фактичних викидів, енергоємності, пікового попиту та виконання плану декарбонізації [195; 196]. Національний енергетичний кодекс NECB 2020 використовує багаторівневу модель підвищення енергоефективності [197]. Методичною перевагою Канади є усунення розриву між «розраховано» і «досягнуто».

Японська CASBEE використовує показник Building Environmental Efficiency як співвідношення якості внутрішнього середовища та послуг будівлі до екологічного навантаження. У системі поєднано енергію, ресурси, локальне довкілля, комфорт і якість управління [198]. BELS забезпечує стандартизоване маркування енергетичної ефективності, а з 2024 р. інформація про енергоспоживання та теплоізоляцію стала частиною ринкової комунікації при продажу й оренді нових будівель [199]. Проєкт PLATEAU створює стандартизовані відкриті 3D-моделі міст, що дає змогу поєднувати будівельні рішення з просторовими, кліматичними та інфраструктурними сценаріями [200].

Сінгапурська Green Mark 2021 оцінює енергетичну результативність, здоров'я і добробут, інтелектуальні системи, стійкість, ресурсне управління та довговічність [201]. Її особливістю є зв'язок з цифровою трансформацією регуляторних процедур. CORENET X переводить багатовідомче погодження у три основні шлюзи, використовує координовану

BIM-модель, відкритий формат IFC+SG, автоматизований Model Checker і BCF-комунікацію [202]. Це приклад, коли цифровізація не нашаровується на старий процес, а супроводжується його реінжинірингом.

В Австралії Green Star Buildings задає проєктні вимоги до позитивного впливу на клімат, ресурсної циркулярності, здоров'я, природи, стійкості й управління. NABERS вимірює фактичну експлуатаційну результативність за енергією, водою, відходами та внутрішнім середовищем, використовуючи щорічну незалежну верифікацію [203; 204]. Внаслідок цього проєктна сертифікація доповнюється регулярним бенчмаркінгом, а рейтинг не зберігається без підтвердження фактичними даними.

Узагальнену порівняльну характеристику регіональних моделей подано в табл. В.1. Її результати дозволяють виокремити п'ять стійких закономірностей: нормативне закріплення життєвого циклу; уніфікацію EPD і баз даних; інтеграцію оцінювання з фінансуванням та закупівлями; розділення проєктного і фактичного результату; перехід до відкритих машинозчитуваних даних.

Таблиця В.1

Порівняння міжнародних моделей оцінювання і цифрового забезпечення біосферосумісного будівництва

Країна / регіон	Основні системи	Домінуючі критерії	Цифрове забезпечення	Інституційна особливість
Європейський Союз	Level(s), EPBD, таксономія ЄС, CPR	GWP життєвого циклу; енергія; матеріали; вода; здоров'я; кліматичні ризики; LCC	EPD, цифровий паспорт продукту, BIM, цифровий журнал будівлі	Нормативні пороги + фінансова класифікація + цифрова простежуваність
Німеччина	BNB, QNG, KfW	Екологічна, економічна, соціокультурна, технічна і процесна якість	ÖKOBAUDAT, eLCA, BIM	Пряма ув'язка сертифікації з державною підтримкою
Велика Британія	BREEAM, PAS 2080, WLC guidance	Whole-life carbon; управління; здоров'я; матеріали; екологія; транспорт	LCA-платформи, BIM, карбонові плани постачальників	Управління вуглецем через бізнес-кейс і закупівлі
США	LEED v5, ASHRAE 189.1, GSA P100, Buy Clean	Операційний і втілений вуглець; вода; здоров'я; екосистеми; резильєнтність	EC3, EPD, BIM, федеральні бази LCA	Ринкові рейтинги + державний попит на низьковуглецеві матеріали
Канада	ZCB Design / Performance, NECB	Нульовий баланс вуглецю; EUI; піковий попит; втілений вуглець; холодоагенти	Енергомодельовання, wbLCA, щорічні дані експлуатації	Розмежування прогнозного і щорічно верифікованого результату
Японія	CASBEE, BELS, ZEB, PLATEAU	BEE; первинна енергія; теплоізоляція; ресурси; комфорт; локальне середовище	Енергетичні етикетки, 3D-моделі міст, цифрові геодані	Поеднання якості користування з екологічним навантаженням
Сінгапур	Green Mark 2021, CORENET X	Енергія; здоров'я; інтелектуальність; стійкість; ресурси; довговічність	IFC+SG, Model Checker, BCF, інтегрований портал	Регуляторний реінжиніринг на основі BIM і автоматизованих правил
Австралія	Green Star, NABERS	Клімат; природа; ресурси; здоров'я; енергія; вода; відходи; внутрішнє середовище	Відкритий реєстр рейтингів, API, експлуатаційні дані	Щорічний бенчмаркінг фактичної результативності

Джерело: систематизовано автором за [178–204].

Відмінності рейтингових систем часто переоцінюються, тоді як їхній спільний методичний каркас залишається недостатньо осмисленим. Усі розглянуті системи охоплюють енергію, воду, матеріали, якість внутрішнього середовища та управління, однак по-різному вирішують проблему критичних порогів. Європейська таксономія і стандарти нульового вуглецю застосовують обов'язкові умови, які не можуть бути компенсовані балами. Класичні рейтингові системи переважно допускають компенсацію. Для біосферосумісного будівництва доцільна дворівнева конструкція: спочатку перевірка некомпенсованих порогів безпеки, вуглецю, впливу на біорізноманіття та достовірності даних; після цього – інтегральне ранжування альтернатив.

Таблиця В.2

Методологічні акценти міжнародних систем сертифікації та бенчмаркінгу

Система	Підсумковий рейтинг	Вуглець та енергія	Ресурси й циркулярність	Здоров'я і комфорт	Біорізноманіття	Фактичні дані
Level(s)	Ні, система індикаторів	Високе	Високе	Середнє	Середнє	Високе
BNB	Так	Високе	Високе	Середнє	Середнє	Середнє
BREEAM	Так	Середнє	Середнє	Високе	Високе	Середнє
LEED v5	Так	Високе	Середнє	Високе	Високе	Високе
CASBEE	Так	Середнє	Середнє	Високе	Високе	Середнє
Green Mark	Так	Високе	Середнє	Високе	Середнє	Високе
Green Star	Так	Високе	Високе	Високе	Високе	Середнє
NABERS	Так, експлуатаційний	Високе	Середнє	Високе	Низьке	Високе

Джерело: авторське порівняння за [178; 185; 188; 192; 198; 201; 203; 204].

Методичні правила підготовки індикаторів до формування Out1–Out5

Етап	Зміст процедури	Результат	Контроль надійності
1. Ідентифікація критерію	Встановлення управлінської властивості, яку має відображати показник	Змістовно визначений критерій у межах Out1–Out5	Відсутність дублювання з іншими критеріями
2. Опис індикатора	Формула, одиниця виміру, напрям впливу, фаза життєвого циклу	Паспорт індикатора	Однозначність розрахунку та інтерпретації
3. Атрибуція даних	Джерело, власник, суб'єкт розрахунку, верифікатор, періодичність	Карта відповідальності за дані	Відтворюваність і відсутність конфлікту інтересів
4. Визначення меж	Нормативна, цільова або бенчмаркова нижня та верхня межа	Параметри L_j та U_j	Перевірка на репрезентативність і стійкість до викидів
5. Нормування	Перетворення різнорозмірних значень у шкалу 0–1	Z_{ij}	Коректне врахування стимуляторів і дестимуляторів
6. Оцінка доказовості	Класифікація джерела та присвоєння q	$\tilde{z}_{ij} = z_{ij}q_{ij}$	Відокремлення слабого результату від слабкої доказовості
7. Зважування	Визначення w у межах конкретного Out	Структура ваг	Аналіз узгодженості та чутливості
8. Перевірка шлюзів	Контроль обов'язкових нормативних, безпекових, екологічних та інформаційних умов	G	Заборона компенсації критичних порушень
9. Формування профілю	Розрахунок Out1–Out5 та аналіз дисбалансів	Компонентний профіль підприємства	Порівняння з рольовим і цільовим профілем
10. Сценарна перевірка	Зміна ваг, меж і сценарних припущень	Інтервал стійкості висновку	Виявлення чутливих параметрів до передачі у модель F

Джерело: розроблено автором.

Порівняльні ознаки моделей інституціоналізації ВІМ у державах ЄС

Модель	Приклади держав	Домінуючий інструмент	Адаптаційне значення для України
Початкова	Австрія, Греція	локальні ініціативи, пілоти, відсутність цілісної національної рамки	демонструє ризик фрагментації та залежності від окремих замовників
Координаційна	Румунія, Угорщина	настанови, робочі групи, дорожні карти, пілотні проекти	доцільна як перехідний етап формування шаблонів і компетентностей
Інституційна	Німеччина, Ірландія	національна стратегія, координаційний центр, навчання, публічні шаблони	потрібна для узгодження державних вимог, ринку та освіти
Нормативна	Італія, Литва	поетапна обов'язковість ВІМ для публічних проектів	можлива після створення відкритих стандартів, методики оцінювання та підтримки МСП
Життєвоциклова	Данія, Фінляндія, Нідерланди	інформаційне управління, відкриті формати, експлуатаційна інтеграція	цільовий орієнтир для поєднання ВІМ, цифрового паспорта, DBL і реєстрів

Джерело: узагальнено автором за [214].

Виміри інтероперабельності цифрової проєктної екосистеми

Вимір	Контрольне питання	Інструмент забезпечення	Критерій прийнятності
Ідентифікаційний	чи стосуються записи того самого об'єкта, елемента, контракту або суб'єкта?	унікальні ідентифікатори, координати, коди класифікаторів	однозначне машинне зіставлення без ручного припущення
Семантичний	чи однаково різні системи трактують показник, властивість і одиницю виміру?	словники даних, класифікатори, IFC-властивості, онтологія	відсутність неоднозначності та документована трансформація
Технічний	чи можуть системи обмінюватися даними без втрати структури?	API, IFC, XML/JSON, стандартизовані схеми	автоматичний імпорт, експорт і контроль цілісності
Процесний	чи вбудовано обмін у контрольну подію та відповідальність?	workflow, статуси, SLA, матриця ролей	дані надходять у строк і запускають визначене рішення
Правовий	чи збережено авторство, повноваження, конфіденційність і доказовість?	КЕП, журнал версій, права доступу, ліцензія на дані	можливість встановити суб'єкта, підставу й чинну версію
Безпековий	чи зберігається доступність, цілісність і відновлюваність?	резервування, багатофакторна автентифікація, моніторинг, план відновлення	встановлений RTO/RPO та протестована процедура реагування

Джерело: розроблено автором.

Мапування стратегічних цілей на цифрові інструменти та докази

Стратегічна ціль	Цільовий індикатор	Цифровий інструмент	Верифікований доказ
Економічна результативність	LCC, NPV, відхилення бюджету, прогноз завершення	5D BIM, ERP, база цін, сценарна аналітика	об'єктно пов'язані обсяги, ціни, платежі, резерви та журнал змін
Скорочення строків	критичний шлях, індекс виконання графіка, тривалість погоджень	4D BIM, workflow, мобільний контроль, цифрові дозволи	актуальний базовий графік, фактичний прогрес і часові мітки рішень
Енергоефективність	питомі витрати енергії, клас, відхилення факту від моделі	енергомодельовання, BMS, цифровий двійник, паспорт реновації	модельні й фактичні часові ряди, умови експлуатації та коригування
Вуглецева результативність	втілені й операційні викиди за життєвим циклом	LCA, EPD, DPP, BIM-відомості матеріалів	походження, кількість, характеристика матеріалу та сценарій кінця життєвого циклу
Циркулярність	частка повторного використання, перероблення, розбірність	матеріальний паспорт, DPP, BIM, цифровий аудит демонтажу	ідентифікований склад, стан, місце та маршрут компонента
Безпека і людиноцентричність	травматизм, доступність, комфорт, скарги й інциденти	BIM-перевірки, IoT, комп'ютерний зір, CRM/портал стейкхолдерів	подія, просторовий контекст, рішення, строк реагування та результат
Стійкість і резильєнтність	час відновлення, залишковий ризик, наявність резервів	цифровий паспорт ризику, KRI, сценарне моделювання, CDE	тригер, власник реагування, виконаний захід і підтверджена готовність

Джерело: розроблено автором.

Етапи впровадження цифрового інструментарію в проєктній екосистемі

Етап	Зміст	Результат етапу	Критерій переходу
1. Декомпозиція цілей	перетворення стратегічних намірів на результати, індикатори й пороги	паспорт цифрової досяжності цілі	кожна ціль має вимірюваний результат і власника
2. Аудит даних і процесів	інвентаризація систем, джерел, розривів, дублювання та ручних передач	карта поточного стану і критичних розривів	встановлено походження, якість та відповідальність за дані
3. Інформаційні вимоги	визначення складу, деталізації, строків і формату інформації	матриця інформаційних потреб за фазами	дані пов'язані з рішенням і контрольним результатом
4. Архітектура і стандарти	вибір ідентифікаторів, класифікаторів, API, IFC, CDE та правил безпеки	цільова архітектура й регламент врядування	підтверджено технічну, семантичну і правову сумісність
5. Пілотний контур	реалізація завершеного циклу для обмеженого проєкту або цілі	працездатний прототип і базова оцінка ефекту	отримано відтворюваний цифровий доказ рішення
6. Інтеграція систем	налаштування обмінів, довідників, прав, версій і контрольних залежностей	інтероперабельний інформаційний потік	відсутнє повторне ручне введення критичних даних
7. Аналітика і тригери	KPI/KRI, сценарії, прогнози, правила ескалації та автоматичні перевірки	аналітичний контур підтримки рішень	відхилення своєчасно запускає визначену дію
8. Врядування і безпека	ролі, навчання, модельний ризик, кіберзахист, резервне відновлення	інституціоналізований режим експлуатації	протестовано права, аудит, безперервність і відповідальність
9. Валідація і масштабування	порівняння з базовим станом та стратегічними результатами	рішення про розширення, коригування або припинення	ефект підтверджений незалежними даними й перевищує сукупні витрати

Джерело: розроблено автором.

Інформаційний профіль зведеного верифікаційного масиву

Підприємство	ЄДРПОУ	Період	Форми фінансової звітності
ТОВ «ГРУПА СМАРТ»	41141967	2020–2025	№ 1-м, № 2-м (2020–2025)
ПрАТ «ВІЩЕМ»	04880386	2020–2025	№ 1, № 2 (2020); № 1, № 2, № 3 (2021–2025)
ПП «Будівельна корпорація «РІЕЛ»»	40273888	2021–2025	№ 1-мс, № 2-мс (2021–2025)
ТОВ «Промислово-будівельна група Ковальська»	35142753	2020–2025	№ 1-м, № 2-м (2020); № 1, № 2, № 3 (2021–2025)
ТОВ «КАДОР ГРУПП»	37136893	2020–2025	№ 1-м, № 2-м (2020–2025)
ПрАТ «Івано-Франківськцемент»	00292988	2020–2025	№ 1, № 2 (2020); № 1, № 2, № 3 (2021–2025)
ТОВ «Будівельна компанія «Інтергал-Буд»»	34692645	2020–2025	№ 1, № 2 (2020); № 1, № 2, № 3 (2021–2025)
ТОВ «Феррострой»	35107305	2020–2025	№ 1, № 2 (2020); № 1, № 2, № 3 (2021–2025)
ТОВ «ГК «Автострада»»	40148165	2020–2025	№ 1, № 2 (2020); № 1, № 2, № 3 (2021–2025)
ТОВ «Автомагістраль-Південь»	34252469	2020–2025	№ 1, № 2 (2020); № 1, № 2, № 3 (2021–2025)
ТОВ «СТРУКТУМ»	38186327	2020–2025	№ 1-м, № 2-м (2020); № 1, № 2, № 3 (2021–2025)
ТОВ «Ательє де Франс Київ»	42862967	2020–2025	№ 1-м, № 2-м (2020–2022); № 1, № 2, № 3 (2023–2025)
ТОВ «Онур Конструкціон Інтернешнл»	32851616	2020–2025	№ 1, № 2 (2020); № 1, № 2, № 3 (2021–2025)
ТОВ «ЛІВ ДЕВЕЛОПМЕНТ»	41549345	2020–2025	№ 1-м, № 2-м (2020–2025)
ТОВ «ЕСТЕТ БУД КОМ»	44034772	2021–2025	№ 1-м, № 2-м (2021–2025)
ТОВ «Ростдорстрой»	33658865	2020–2025	№ 1, № 2 (2020); № 1, № 2, № 3 (2021–2025)
ТОВ «ПРОБУДТРАНС»	45129482	2022–2025	№ 1-м, № 2-м (2022–2025)
ТОВ «Моноліт Будсервіс»	39778632	2020–2025	№ 1, № 2 (2020); № 1, № 2, № 3 (2021–2025)
ТОВ «Київська енергетична будівельна компанія»	32878418	2020–2025	№ 1, № 2 (2020); № 1, № 2, № 3 (2021–2025)
ТОВ «СТОЛИЦЯ ГРУП»	36175203	2020–2025	№ 1-м, № 2-м (2020–2025)
ТОВ «ЕКОБУДОСНОВА»	43265431	2020–2025	№ 1-м, № 2-м (2020–2025)

Джерело: сформовано автором на основі [295-334]

Таблиця Є.2

Зведені верифіковані показники балансу досліджуваних підприємств за 2020–2025 рр., тис. грн

Підприємство	Рік	Необоротні активи (1095)	Оборотні активи (1195)	Активи (1300)	Власний капітал (1495)	Довгострокові зобов'язання (1595)	Поточні зобов'язання (1695)
ГРУПА СМАРТ	2020	862,1	846,3	1 708,40	1 466,40	0	242
ГРУПА СМАРТ	2021	780,2	1 865,20	2 645,40	2 180	–	465,4
ГРУПА СМАРТ	2022	910,2	435	1 345,20	-579,3	–	1 924,50
ГРУПА СМАРТ	2023	3 040,30	973,4	4 013,70	3 486,40	–	527,3
ГРУПА СМАРТ	2024	2 783,40	568,3	3 351,70	3 016,90	–	334,8
ГРУПА СМАРТ	2025	2 564,60	515,7	3 080,30	2 521,50	–	558,8
ВІПЦЕМ	2020	1 518 589	1 070 669	2 589 258	807 976	1 418 826	362 456
ВІПЦЕМ	2021	1 507 860	1 284 941	2 792 801	1 151 825	1 212 809	428 167
ВІПЦЕМ	2022	1 387 910	961 473	2 349 383	559 018	1 508 518	281 847
ВІПЦЕМ	2023	1 311 796	1 362 530	2 674 326	232 564	2 114 749	327 013
ВІПЦЕМ	2024	1 243 801	1 633 839	2 877 640	204 336	1 811 901	861 403
ВІПЦЕМ	2025	1 543 855	2 376 735	3 920 590	-13 958	176 429	3 758 119
РІЕЛ	2021	97,9	66 395,90	66 493,80	-14 722,80	–	81 216,60
РІЕЛ	2022	97,9	66 395,90	66 493,80	-14 722,80	–	81 216,60
РІЕЛ	2023	5	18 582,50	18 587,50	277,6	–	18 309,90
РІЕЛ	2024	5	19 922,70	19 927,70	286,4	–	19 641,30
РІЕЛ	2025	5	23 634,70	23 639,70	857,6	–	22 782,10
ПБГ Ковальська	2020	647 031,40	33 877,90	680 909,30	371 272,10	2 627,80	307 009,40
ПБГ Ковальська	2021	686 324	74 312	760 636	389 872	0	370 764
ПБГ Ковальська	2022	305 284	73 225	378 509	-83 491	0	462 000
ПБГ Ковальська	2023	178 612	222 796	401 408	-40 003	21 985	419 426

ПБГ Ковальська	2024	114 408	355 096	469 504	-10 758	9 932	470 330
ПБГ Ковальська	2025	100 648	521 673	622 321	115 495	9 940	496 886
КАДОР ГРУПП	2020	0	8 139,10	8 139,10	-1 215,90	—	9 355
КАДОР ГРУПП	2021	0	10 347,30	10 347,30	-957,7	—	11 305
КАДОР ГРУПП	2022	0	19 787,40	19 787,40	-1 007,60	—	20 795
КАДОР ГРУПП	2023	0	2 849,70	2 849,70	1 239,40	—	1 610,30
КАДОР ГРУПП	2024	0	8 236	8 236	1 392,60	—	6 843,40
КАДОР ГРУПП	2025	0	8 182,10	8 182,10	1 522,70	—	6 659,40
Івано- Франківськцемен Т	2020	3 704 895	1 608 830	5 313 725	3 263 602	772 940	1 277 183
Івано- Франківськцемен Т	2021	5 608 809	1 522 290	7 131 099	4 967 043	634 206	1 529 850
Івано- Франківськцемен Т	2022	5 570 731	2 453 922	8 024 653	5 697 089	493 904	1 833 660
Івано- Франківськцемен Т	2023	6 728 489	2 985 142	9 713 631	7 390 803	392 731	1 930 097
Івано- Франківськцемен Т	2024	8 137 889	5 300 560	13 438 449	10 283 721	605 860	2 548 868
Івано- Франківськцемен Т	2025	9 660 043	4 605 713	14 265 756	10 892 961	993 441	2 379 354
Інтергал-Буд	2020	25 409	1 921 624	1 947 033	55 263	0	1 891 770
Інтергал-Буд	2021	17 823	2 745 291	2 763 114	-2 799	0	2 765 913
Інтергал-Буд	2022	11 625	1 737 246	1 748 871	9 438	0	1 739 433
Інтергал-Буд	2023	13 865	1 680 136	1 694 001	-8 351	0	1 702 352
Інтергал-Буд	2024	17 814	1 566 158	1 583 972	-65 754	0	1 649 726
Інтергал-Буд	2025	13 506	1 800 274	1 813 780	-86 576	0	1 900 356
Феррострой	2020	110 854	839 044	949 898	232 917	15 214	701 767
Феррострой	2021	227 537	1 083 386	1 310 923	236 922	0	1 074 001

Феррострой	2022	292 469	607 494	899 963	170 720	0	729 243
Феррострой	2023	391 242	466 222	857 464	241 086	6 642	609 736
Феррострой	2024	363 838	730 940	1 094 778	539 456	10 484	544 838
Феррострой	2025	299 131	624 168	923 299	519 450	840	403 009
ГК Автострада	2020	455 222	840 601	1 295 823	578 469	98 624	618 730
ГК Автострада	2021	1 516 360	1 706 876	3 223 236	312 312	1 143 847	1 767 077
ГК Автострада	2022	1 392 101	4 303 033	5 695 134	837 243	664 466	4 193 425
ГК Автострада	2023	1 620 854	6 988 331	8 609 185	1 382 985	248 559	6 977 641
ГК Автострада	2024	1 475 454	2 302 809	3 778 263	1 413 429	137 430	2 227 404
ГК Автострада	2025	1 314 714	4 085 011	5 399 725	1 694 461	192 528	3 512 736
Автомагістраль-Південь	2020	472 238	7 400 475	7 872 713	1 163 025	0	6 709 688
Автомагістраль-Південь	2021	346 951	12 140 646	12 487 597	1 785 440	194 001	10 508 156
Автомагістраль-Південь	2022	253 112	11 444 047	11 697 159	1 943 260	194 001	9 559 898
Автомагістраль-Південь	2023	334 308	15 341 001	15 675 309	2 695 924	141 149	12 838 236
Автомагістраль-Південь	2024	440 443	14 426 037	14 866 480	3 950 442	141 889	10 774 149
Автомагістраль-Південь	2025	590 173	14 704 814	15 294 987	4 196 323	149 062	10 949 602
СТРУКТУМ	2020	29 515	183 826,30	213 341,30	38 868,60	5 964,20	168 508,50
СТРУКТУМ	2021	48 268	772 382	820 650	35 755	0	784 895
СТРУКТУМ	2022	55 797	490 970	546 767	35 781	0	510 986
СТРУКТУМ	2023	69 188	458 434	527 622	16 645	0	510 977
СТРУКТУМ	2024	102 606	1 902 141	2 004 747	97 256	0	1 907 491
СТРУКТУМ	2025	126 113	2 382 420	2 508 533	207 023	0	2 301 510
Ательє де Франс Київ	2020	1 151,40	1 094 510,80	1 095 662,20	2 849,90	378	1 092 434,30
Ательє де Франс Київ	2021	1 826,10	1 380 696,50	1 382 522,60	25 528,10	1 232,60	1 355 761,90
Ательє де Франс Київ	2022	642,9	2 103 463	2 104 105,90	6 657,10	53 252,30	2 044 196,50

Ательє де Франс Київ	2023	1 014	2 665 810	2 666 824	20 741	0	2 646 083
Ательє де Франс Київ	2024	19 329	2 316 388	2 335 717	64 894	0	2 270 823
Ательє де Франс Київ	2025	13 648	957 014	970 662	204 834	0	765 828
Онур Конструкціон Інтернешнл	2020	399 460	4 500 754	4 900 214	107 891	0	4 792 323
Онур Конструкціон Інтернешнл	2021	457 894	7 719 680	8 177 574	391 241	0	7 786 333
Онур Конструкціон Інтернешнл	2022	614 045	6 676 928	7 290 973	518 253	0	6 772 720
Онур Конструкціон Інтернешнл	2023	1 003 855	8 087 591	9 091 446	660 210	0	8 431 236
Онур Конструкціон Інтернешнл	2024	1 781 463	5 322 449	7 103 912	1 022 870	559 504	5 521 538
Онур Конструкціон Інтернешнл	2025	1 667 882	6 045 498	7 713 385	1 118 838	3 501	6 591 046
ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ	2020	137 260,40	183 495,30	320 755,70	-23 778,80	322 916,80	21 617,70
ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ	2021	168 600,90	230 871,50	399 472,40	4 569	285 456,10	109 447,30
ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ	2022	226 759,70	271 625,20	498 384,90	43 113,90	321 095,10	134 175,90
ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ	2023	169 652,90	432 731,30	602 384,20	14 149,70	522 062,70	66 171,80
ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ	2024	232 699,40	533 189,30	765 888,70	28 681,30	680 954,50	56 252,90
ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ	2025	217 356,80	544 915	762 271,80	42 708,50	605 645,60	113 917,70
ЕСТЕТ БУД КОМ	2021	112	445,2	557,2	83,3	0	473,9
ЕСТЕТ БУД КОМ	2022	88	705,2	793,2	130,9	—	662,3
ЕСТЕТ БУД КОМ	2023	302,9	1 697,70	2 000,60	344,5	—	1 656,10
ЕСТЕТ БУД КОМ	2024	359,7	5 847,60	6 207,30	2 372,90	—	3 834,40
ЕСТЕТ БУД КОМ	2025	1 451,10	4 387,40	5 838,50	3 124,60	989,1	1 724,80
Ростдорстрой	2020	14 304	3 611 587	3 625 891	39 733	28	3 586 130
Ростдорстрой	2021	56 093	4 705 336	4 761 429	-88 755	36 131	4 814 053

Ростдорстрой	2022	55 223	5 303 366	5 358 589	-319 939	34 455	5 644 073
Ростдорстрой	2023	77 674	6 337 072	6 414 746	-131 610	24 748	6 521 608
Ростдорстрой	2024	99 538	4 990 852	5 090 390	-18 365	21 370	5 087 385
Ростдорстрой	2025	70 865	5 535 654	5 606 519	-148 741	9 608	5 745 652
ПРОБУДТРАНС	2022	0	0	0	0	–	0
ПРОБУДТРАНС	2023	0	96,8	96,8	96	–	0,8
ПРОБУДТРАНС	2024	32,5	5 556,90	5 589,40	165,6	–	5 423,80
ПРОБУДТРАНС	2025	251	11 949	12 200	772	–	11 428
Моноліт Будсервіс	2020	11 402	1 314 943	1 326 345	27 108	0	1 299 237
Моноліт Будсервіс	2021	9 872	2 014 130	2 024 002	36 879	0	1 987 123
Моноліт Будсервіс	2022	8 772	1 661 359	1 670 131	39 574	0	1 630 557
Моноліт Будсервіс	2023	8 473	1 784 215	1 792 688	51 334	0	1 741 354
Моноліт Будсервіс	2024	10 270	1 111 919	1 122 189	64 676	0	1 057 513
Моноліт Будсервіс	2025	17 320	1 339 828	1 357 148	78 605	0	1 278 543
Київська енергетична БК	2020	5 411	750 893	756 304	18 554	85 545	645 996
Київська енергетична БК	2021	13 005	893 814	906 819	9 315	45 915	848 242
Київська енергетична БК	2022	11 027	3 545 128	3 556 155	9 822	2 341 171	1 203 082
Київська енергетична БК	2023	12 424	2 667 044	2 679 468	11 733	0	2 667 735
Київська енергетична БК	2024	16 012	1 355 174	1 371 186	28 599	0	1 342 587
Київська енергетична БК	2025	22 227	793 540	815 767	14 223	0	801 544
СТОЛИЦЯ ГРУП	2020	3 647,70	1 159 983,60	1 163 631,30	-46 026,60	213,2	1 209 444,70
СТОЛИЦЯ ГРУП	2021	3 973,20	1 299 831,20	1 303 804,40	-84 090,10	308,5	1 387 586
СТОЛИЦЯ ГРУП	2022	8 101,80	1 354 735,90	1 362 837,70	-119 673,90	635,5	1 481 876,10
СТОЛИЦЯ ГРУП	2023	13 584,80	940 718,50	954 303,30	-139 628,60	1 316,90	1 092 615
СТОЛИЦЯ ГРУП	2024	17 287,30	911 809,40	929 096,70	-139 777,60	1 225,20	1 067 649,10
СТОЛИЦЯ ГРУП	2025	18 161	2 203 344,80	2 221 505,80	-153 215,80	1 072,40	2 373 649,20

ЕКОБУДОСНОВ А	2020	0	1 023,60	1 023,60	125,4	–	898,2
ЕКОБУДОСНОВ А	2021	0	759,8	759,8	163,9	–	595,9
ЕКОБУДОСНОВ А	2022	0	569,8	569,8	77,1	–	492,7
ЕКОБУДОСНОВ А	2023	0	37,4	37,4	-838,9	–	876,3
ЕКОБУДОСНОВ А	2024	0	294,6	294,6	-782,9	–	1 077,50
ЕКОБУДОСНОВ А	2025	0	96,1	96,1	-740,6	–	836,7

Джерело: сформовано автором на основі [295-334]

Таблиця Є.3

Зведені верифіковані показники фінансових результатів досліджуваних підприємств за 2020–2025 рр., тис. грн

Підприємство	Рік	Чистий дохід (2000)	Собівартість (2050)	Фінансовий результат до оподаткування (2290/2295)	Чистий фінансовий результат (2350/2355)
ГРУПА СМАРТ	2020	5 654,20	0	1 287,10	1 287,10
ГРУПА СМАРТ	2021	7 490,20	–	2 000,80	2 000,80
ГРУПА СМАРТ	2022	3 115,70	–	-758,6	-758,6
ГРУПА СМАРТ	2023	12 411,70	–	3 045,70	3 045,70
ГРУПА СМАРТ	2024	7 911,60	–	-1 069,50	-1 069,50
ГРУПА СМАРТ	2025	9 111	–	-495,6	-495,6
ВІПЦЕМ	2020	3 443 736	2 681 359	-49 257	-46 305
ВІПЦЕМ	2021	3 888 638	3 305 794	352 572	343 742
ВІПЦЕМ	2022	1 940 154	1 994 737	-637 966	-653 511
ВІПЦЕМ	2023	3 260 966	2 879 517	-295 811	-312 862
ВІПЦЕМ	2024	4 044 383	3 754 881	-331 102	-331 102
ВІПЦЕМ	2025	4 747 155	3 981 961	-217 719	-217 719
РІЕЛ	2021	4 938,70	–	3 784,10	3 784,10
РІЕЛ	2022	4 938,70	–	3 784,10	3 784,10
РІЕЛ	2023	10 417,90	–	10 292,20	10 292,20
РІЕЛ	2024	847,2	–	8,8	8,8
РІЕЛ	2025	1 222	–	575,1	575,1
ПБГ Ковальська	2020	146 200	19 353,60	225 845,50	225 845,50
ПБГ Ковальська	2021	185 121	83 483	20 604	18 682
ПБГ Ковальська	2022	36 624	20 010	-471 174	-471 174
ПБГ Ковальська	2023	19 695	12 248	40 461	43 488
ПБГ Ковальська	2024	–	–	27 116	29 245
ПБГ Ковальська	2025	28 752	–	128 152	126 253

КАДОР ГРУПП	2020	14 267,70	14 604,40	-342,8	-342,8
КАДОР ГРУПП	2021	18 195,20	17 916,50	258,2	258,2
КАДОР ГРУПП	2022	15 973,60	15 710,40	-49,9	-49,9
КАДОР ГРУПП	2023	11 463,60	9 183,70	2 279,90	2 247
КАДОР ГРУПП	2024	15 180,10	14 993,30	186,8	153,2
КАДОР ГРУПП	2025	12 975,50	12 816,90	158,6	130,1
Івано-Франківськцемент	2020	7 090 641	4 530 780	1 607 674	1 318 248
Івано-Франківськцемент	2021	7 833 385	4 801 169	2 332 173	1 912 162
Івано-Франківськцемент	2022	6 586 839	4 891 361	1 001 908	821 311
Івано-Франківськцемент	2023	10 742 073	7 491 114	2 068 776	1 696 191
Івано-Франківськцемент	2024	13 510 339	8 920 204	3 614 962	2 964 749
Івано-Франківськцемент	2025	16 253 172	9 811 592	5 223 127	4 285 452
Інтергал-Буд	2020	2 125 803	2 107 251	-3 089	-3 113
Інтергал-Буд	2021	1 568 988	1 545 576	-8 913	-8 913
Інтергал-Буд	2022	1 250 289	1 232 543	7 887	7 887
Інтергал-Буд	2023	959 234	947 040	-22 960	-22 960
Інтергал-Буд	2024	839 142	828 891	-61 317	-61 317
Інтергал-Буд	2025	1 114 139	1 096 215	-40 848	-40 848
Феррострой	2020	1 330 538	943 602	248 938	203 976
Феррострой	2021	1 838 011	1 396 493	24 986	4 005
Феррострой	2022	1 951 969	1 597 468	-61 180	-65 644
Феррострой	2023	1 545 637	960 005	159 550	112 357
Феррострой	2024	2 624 642	1 741 308	382 991	298 407
Феррострой	2025	2 056 482	1 644 957	-17 728	-19 733
ГК Автострада	2020	5 106 840	4 670 838	388 779	317 613
ГК Автострада	2021	10 859 280	10 750 092	4 616	1 004
ГК Автострада	2022	4 486 709	3 868 407	508 290	504 934
ГК Автострада	2023	8 071 376	7 171 318	70 336	46 966
ГК Автострада	2024	10 828 236	10 391 656	95 257	74 594
ГК Автострада	2025	14 701 943	14 062 912	239 147	193 032
Автомобільна Південь	2020	16 867 916	16 525 043	774 111	633 870
Автомобільна Південь	2021	22 926 035	22 334 213	486 600	399 787

Автомагістраль-Південь	2022	7 569 188	7 453 406	297 645	157 820
Автомагістраль-Південь	2023	8 215 026	7 620 995	853 780	706 683
Автомагістраль-Південь	2024	13 197 373	11 848 906	1 683 583	1 363 797
Автомагістраль-Південь	2025	10 198 290	9 627 901	477 313	389 521
СТРУКТУМ	2020	235 668	173 684,40	6 949,20	5 698,30
СТРУКТУМ	2021	237 837	197 113	2 001	1 632
СТРУКТУМ	2022	375 466	333 867	32	26
СТРУКТУМ	2023	58 163	44 565	-19 136	-19 136
СТРУКТУМ	2024	1 475 647	1 297 866	94 122	80 397
СТРУКТУМ	2025	2 261 656	2 017 238	133 873	109 767
Ательс де Франс Київ	2020	107 841,10	83 641,50	3 397,70	3 059,20
Ательс де Франс Київ	2021	901 815,80	794 957,90	29 343,80	24 047,20
Ательс де Франс Київ	2022	310 809	261 665,80	-11 333,80	-18 870,90
Ательс де Франс Київ	2023	451 217	370 313	14 084	14 084
Ательс де Франс Київ	2024	2 901 148	2 724 889	70 122	44 153
Ательс де Франс Київ	2025	4 684 898	4 460 796	149 843	139 940
Онур Конструкціон Інтернешнл	2020	8 851 805	8 822 389	78 866	62 402
Онур Конструкціон Інтернешнл	2021	12 338 291	12 022 756	344 482	283 350
Онур Конструкціон Інтернешнл	2022	3 109 664	2 952 167	156 176	127 011
Онур Конструкціон Інтернешнл	2023	2 927 846	2 697 838	177 217	141 957
Онур Конструкціон Інтернешнл	2024	3 797 905	3 377 315	516 539	421 238
Онур Конструкціон Інтернешнл	2025	2 866 274	2 652 802	118 709	97 003
ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ	2020	45 762,30	40 814,10	-12 887,80	-12 887,80
ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ	2021	141 204,10	95 533,50	29 762,40	28 216,70

ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ	2022	81 995,20	47 038,80	58 191,60	53 833,80
ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ	2023	120 680,80	76 192,10	-11 045,90	-15 964,20
ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ	2024	66 117	29 499,60	19 498,20	15 959,90
ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ	2025	180 325,70	122 893,20	32 908,20	26 984,70
ЕСТЕТ БУД КОМ	2021	1 025,20	993,2	-36,7	-36,7
ЕСТЕТ БУД КОМ	2022	1 515,70	1 329,10	58,1	47,6
ЕСТЕТ БУД КОМ	2023	4 994,70	4 603,40	260,4	213,5
ЕСТЕТ БУД КОМ	2024	17 309,60	14 312,20	2 472,40	2 027,40
ЕСТЕТ БУД КОМ	2025	11 459,80	9 926,10	916,7	751,7
Ростдорстрой	2020	8 099 514	7 996 276	89 108	75 847
Ростдорстрой	2021	8 787 418	8 441 171	-104 680	-106 550
Ростдорстрой	2022	3 390 272	3 368 359	-247 084	-247 084
Ростдорстрой	2023	5 971 502	5 345 074	135 980	125 849
Ростдорстрой	2024	6 852 314	6 279 275	146 898	94 317
Ростдорстрой	2025	5 180 098	5 125 623	14 025	201
ПРОБУДТРАНС	2022	—	—	0	0
ПРОБУДТРАНС	2023	—	—	-4	-4
ПРОБУДТРАНС	2024	10 168	9 618,20	84,8	69,5
ПРОБУДТРАНС	2025	40 213	38 411,80	739,6	606,5
Моноліт Будсервіс	2020	2 321 405	2 301 080	9 581	7 915
Моноліт Будсервіс	2021	2 554 743	2 533 282	12 087	9 784
Моноліт Будсервіс	2022	1 406 159	1 393 423	4 003	2 701
Моноліт Будсервіс	2023	2 016 028	1 994 228	14 407	11 772
Моноліт Будсервіс	2024	2 028 162	1 997 909	16 356	13 344
Моноліт Будсервіс	2025	2 067 702	2 034 880	16 965	13 929
Київська енергетична БК	2020	958 153	931 118	707	14
Київська енергетична БК	2021	456 774	426 485	528	18
Київська енергетична БК	2022	655 754	633 634	745	507
Київська енергетична БК	2023	2 459 249	2 348 945	3 907	1 911
Київська енергетична БК	2024	2 302 304	2 252 064	20 351	16 866

Київська енергетична БК	2025	1 820 883	1 750 015	5 165	4 401
СТОЛИЦЯ ГРУП	2020	109 411,40	68 536,20	11 242,40	11 242,40
СТОЛИЦЯ ГРУП	2021	45 065,20	53 718,20	-37 947	-37 947
СТОЛИЦЯ ГРУП	2022	59 202,40	58 757,70	-35 673,20	-35 673,20
СТОЛИЦЯ ГРУП	2023	138 912,80	114 312,50	-18 611,70	-18 611,70
СТОЛИЦЯ ГРУП	2024	144 303,80	75 436,60	-180,3	-180,3
СТОЛИЦЯ ГРУП	2025	116 170,80	28 791,90	-7 525	-7 525
ЕКОБУДОСНОВА	2020	10 939	10 753,20	46,7	38,3
ЕКОБУДОСНОВА	2021	8 917	8 639,70	47	38,5
ЕКОБУДОСНОВА	2022	1 082,10	1 080,90	-86,8	-86,8
ЕКОБУДОСНОВА	2023	—	—	-916	-916
ЕКОБУДОСНОВА	2024	923,5	853,4	68,3	56
ЕКОБУДОСНОВА	2025	928,8	836,8	51,6	42,3

Джерело: сформовано автором на основі [295-334]

Зведені верифіковані показники руху грошових коштів підприємств, що подавали форму № 3, за 2021–2025 рр., тис. грн

Підприємство	Рік	Операційна діяльність (3195)	Інвестиційна діяльність (3295)	Фінансова діяльність (3395)	Чистий рух коштів (3400)
ВІПЦЕМ	2021	447 407	-197 793	-5 781	243 833
ВІПЦЕМ	2022	-542 491	-60 546	182 843	-420 194
ВІПЦЕМ	2023	48 741	-81 557	174 397	141 581
ВІПЦЕМ	2024	-115 062	-112 487	294 294	66 745
ВІПЦЕМ	2025	-27 770	-297 517	473 824	148 537
ПБГ Ковальська	2021	5 170	-41 762	31 000	-5 592
ПБГ Ковальська	2022	436	-295 209	294 409	-364
ПБГ Ковальська	2023	102 600	-78 177	-22 448	1 975
ПБГ Ковальська	2024	20 224	-57 501	36 905	-372
ПБГ Ковальська	2025	52 415	-61 262	9 922	1 075
Івано-Франківськцемент	2021	2 314 117	-1 971 760	-225 862	116 495
Івано-Франківськцемент	2022	214 175	-225 933	-181 133	-192 891
Івано-Франківськцемент	2023	2 393 662	-1 734 111	-428 040	231 511
Івано-Франківськцемент	2024	3 134 956	-3 413 334	512 584	234 206
Івано-Франківськцемент	2025	4 342 292	-957 436	-3 518 792	-133 936
Інтергал-Буд	2021	-27 489	-2 494	30 257	274
Інтергал-Буд	2022	-60 202	-4 650	64 636	-216
Інтергал-Буд	2023	11 458	-9 515	-2 084	-141
Інтергал-Буд	2024	-52 127	-734	53 068	207
Інтергал-Буд	2025	-192 475	0	193 313	838
Феррострой	2021	-6 937	-893	0	-7 830
Феррострой	2022	84 490	-93 314	0	-8 824
Феррострой	2023	8 591	-12 418	0	-3 827
Феррострой	2024	29 467	-27 455	0	2 012
Феррострой	2025	4 074	-4 672	0	-598
ГК Автострада	2021	443 740	-34 781	267 154	676 113
ГК Автострада	2022	-431 900	21 693	19 972	-390 235
ГК Автострада	2023	854 548	-658 055	344 241	540 734
ГК Автострада	2024	627 039	-243 727	-1 064 095	-680 783

ГК Автострада	2025	1 351 007	-254 259	-35 387	1 061 361
Автомагістраль-Південь	2021	2 140 665	98 435	235 168	2 474 268
Автомагістраль-Південь	2022	-1 212 826	284 507	-271 572	-1 199 891
Автомагістраль-Південь	2023	-1 636 450	-778 298	1 419 234	-995 514
Автомагістраль-Південь	2024	1 487 695	3 520	-10 564	1 480 651
Автомагістраль-Південь	2025	266 048	-504 521	19 413	-219 060
СТРУКТУМ	2021	45 401	-26 282	0	19 119
СТРУКТУМ	2022	-6 811	-29 764	0	-36 575
СТРУКТУМ	2023	4 220	-19 980	0	-15 760
СТРУКТУМ	2024	405 296	-41 559	0	363 737
СТРУКТУМ	2025	586 662	-19 987	0	566 675
Ательє де Франс Київ	2023	-57 341	0	0	-57 341
Ательє де Франс Київ	2024	42 468	0	0	42 468
Ательє де Франс Київ	2025	-78 035	0	0	-78 035
Онур Конструкціон Інтернешнл	2021	152 527	-34 212	156 952	275 267
Онур Конструкціон Інтернешнл	2022	-147 271	3 764	-270 643	-414 150
Онур Конструкціон Інтернешнл	2023	388 486	2 367	61 743	452 596
Онур Конструкціон Інтернешнл	2024	288 501	-909 085	253 860	-366 724
Онур Конструкціон Інтернешнл	2025	535 738	-83 182	-260 017	192 539
Ростдорстрой	2021	-2 272 423	26 818	1 726 000	-519 605
Ростдорстрой	2022	-545 403	-14 409	-224 876	-784 688
Ростдорстрой	2023	1 586 279	-38 104	-1 576 311	-28 136
Ростдорстрой	2024	-65 535	-22 435	37 460	-50 510
Ростдорстрой	2025	781 837	-6 373	-538 359	237 105
Моноліт Будсервіс	2021	57 345	15 306	-71 445	1 206
Моноліт Будсервіс	2022	13 312	1 549	-12 663	2 198
Моноліт Будсервіс	2023	5 946	-3 108	-4 000	-1 162

Моноліт Будсервіс	2024	35 974	178 371	-209 926	4 419
Моноліт Будсервіс	2025	119 042	35 747	-146 599	8 190
Київська енергетична БК	2021	32 391	3 766	-28 980	7 177
Київська енергетична БК	2022	152 657	-4 339	13 320	161 638
Київська енергетична БК	2023	456 452	4 300	-19 574	441 178
Київська енергетична БК	2024	-414 818	-27 777	-26 458	-469 053
Київська енергетична БК	2025	-127 146	-11 437	-18 777	-157 360

Джерело: сформовано автором на основі [295-334]

Операціоналізація первинних індикаторів In1–In20 моделі IDEM

Блок	Індикатор	Зміст	Доказова база	Напрямок	Нормування / оцінювання
Out1	In1	Рентабельність операційної діяльності	Операційний прибуток; чистий дохід; динаміка 2023–2025	прямий	нормування 0–1; підвищена вага останнього року
Out1	In2	Фінансова стійкість	Автономія; поточна й абсолютна ліквідність; чистий борг/EBITDA	змішаний	композит нормованих прямих та обернених показників
Out1	In3	Ресурсно-економічна ефективність	Валова маржа; оборотність активів; операційний грошовий потік; CAGR	прямий	композит нормованих показників
Out1	In4	Інвестиційно-економічна привабливість	MarketScore; FinScore; CAGR; масштаб доходу	прямий	композит нормованих показників
Out2	In5	Цифрова інтеграція процесів	BIM, SCADA, CDE, інтегровані цифрові платформи	прямий	доказово-експертна шкала 0–1
Out2	In6	Автоматизація управлінських процесів	Планування, контроль, документообіг, диспетчеризація	прямий	доказово-експертна шкала 0–1
Out2	In7	Зрілість управління даними	Централізований збір, архіви, аналітика, обмін даними	прямий	доказово-експертна шкала 0–1
Out2	In8	Цифрова компетентність персоналу	Підготовка фахівців, навчання, робота з цифровими системами	прямий	доказово-експертна шкала 0–1
Out3	In9	Енергоефективність виробництва	Енергоощадні технології, автоматизований облік, зниження енерговитрат	прямий	доказово-експертна шкала 0–1
Out3	In10*	Обернена оцінка інтенсивності екологічного впливу	Порушення, викиди, відходи, водокористування, екологічні ризики	обернений	In10*=1–In10; більше значення = менший негативний вплив
Out3	In11	Ефективність використання ресурсів і матеріалів	Ресайклінг, повторне використання, технологічні втрати, ресурсний контроль	прямий	доказово-експертна шкала 0–1
Out3	In12	ESG-екологічна відповідність	ISO 14001, ESG-політика, дозволи, звітність, екологічний менеджмент	прямий	доказово-експертна шкала 0–1
Out4	In13	Безпека та якість трудового середовища	Охорона праці, перевірки, кадрова стабільність, умови праці	прямий	доказово-експертна шкала 0–1
Out4	In14	Задоволеність стейкхолдерів	Довіра, партнерські відносини, репутація, стабільність взаємодії	прямий	доказово-експертна шкала 0–1

Блок	Індикатор	Зміст	Доказова база	Напрямок	Нормування / оцінювання
Out4	In15	Корпоративна соціальна відповідальність	Соціальні програми, громади, прозорість, гуманітарні ініціативи	прямий	доказово-експертна шкала 0–1
Out4	In16	Ефективність комунікаційної взаємодії	Доступність інформації, цифрові канали, координація учасників	прямий	доказово-експертна шкала 0–1
Out5	In17	Адаптивність системи управління	Реагування на зміни, перебудова процесів, відновлення	прямий	доказово-експертна шкала 0–1
Out5	In18	Інноваційна активність	R&D, нові технології, цифрові й екологічні інновації	прямий	доказово-експертна шкала 0–1
Out5	In19	Ризикостійкість	Фінансові, операційні, кадрові, екологічні, репутаційні ризики	прямий	доказово-експертна шкала 0–1
Out5	In20	Стратегічна організаційна гнучкість	Диверсифікація, масштабування, міжфункціональна координація	прямий	доказово-експертна шкала 0–1

Функціональна типологія вибірки та логіка включення підприємств

Підприємство	Передбачувана роль у проєкті	Типологічний контраст	Аналітичне призначення у вибірці
ТОВ «ПБГ “Ковальська”»	виробничо-ресурсний інтегратор і постачальник будівельних матеріалів	виробник / ресурсний постачальник	перевірка чутливості моделі до ресурсної, енергетичної та вуглецевої інтенсивності
ПрАТ «Івано-Франківськцемент»	виробник цементу та постачальник низьковуглецевих будівельних матеріалів	виробник / ресурсний постачальник	перевірка чутливості моделі до ресурсної, енергетичної та вуглецевої інтенсивності
ТОВ «ГК “Автострада”»	генеральний інфраструктурний підрядник і Design&Build-інтегратор	інфраструктурний підрядник	перевірка поєднання масштабу, мобільності, цифрового контролю, екологічного й кадрового ризику
ПрАТ «ВІЩЕМ»	виробник цементу та постачальник мінеральних будівельних матеріалів	виробник / ресурсний постачальник	перевірка чутливості моделі до ресурсної, енергетичної та вуглецевої інтенсивності
ТОВ «Автомобільна-Південь»	генеральний дорожньо-інфраструктурний підрядник із власним виробничим і R&D-контуром	інфраструктурний підрядник	перевірка поєднання масштабу, мобільності, цифрового контролю, екологічного й кадрового ризику
ТОВ «СТРУКТУМ»	ЕРС- та генеральний підрядник електроенергетичної і промислової інфраструктури	інженерний / спеціалізований підрядник	перевірка технологічної спеціалізації, цифрової інтеграції та роботи ММСП у спільній шкалі
ТОВ «Ательє де Франс Київ»	спеціалізований реставраційний підрядник об'єктів культурної спадщини та цивільного будівництва	інженерний / спеціалізований підрядник	перевірка технологічної спеціалізації, цифрової інтеграції та роботи ММСП у спільній шкалі
ТОВ «Онур Конструкціон Інтернешнл»	міжнародний генеральний інфраструктурний підрядник і виробничо-ресурсний інтегратор	інфраструктурний підрядник	перевірка поєднання масштабу, мобільності, цифрового контролю, екологічного й кадрового ризику
ТОВ «ФЕРРОСТРОЙ»	повноцикловий промисловий будівельно-монтажний підрядник та інтегратор	інженерний / спеціалізований підрядник	перевірка технологічної спеціалізації, цифрової інтеграції та роботи ММСП у спільній шкалі
ТОВ «ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ»	девелопер і координатор інвестиційно-будівельного контуру	девелопер / замовник-координатор	перевірка фінансової стійкості, стейкхолдерної координації та довгострокової проєктної спроможності
ПП «Будівельна корпорація “РІЕЛ”»	девелопер і замовник-координатор житлових будівельних проєктів	девелопер / замовник-координатор	перевірка фінансової стійкості, стейкхолдерної координації та довгострокової проєктної спроможності
ТОВ «ЕСТЕТ БУД КОМ»	спеціалізований будівельно-монтажний підрядник	інженерний / спеціалізований підрядник	перевірка технологічної спеціалізації, цифрової інтеграції та роботи ММСП у спільній шкалі

Підприємство	Передбачувана роль у проєкті	Типологічний контраст	Аналітичне призначення у вибірці
ТОВ «ГРУПА СМАРТ»	будівельно-девелоперський учасник і підрядник	інженерний / спеціалізований підрядник	перевірка технологічної спеціалізації, цифрової інтеграції та роботи ММСП у спільній шкалі
ТОВ «Ростдорстрой»	генеральний дорожньо-мостовий підрядник і виробничо-технологічний інтегратор	інфраструктурний підрядник	перевірка поєднання масштабу, мобільності, цифрового контролю, екологічного й кадрового ризику
ТОВ «ПРОБУДТРАНС»	універсальний будівельно-монтажний підрядник із виробничо-логістичною підтримкою	інфраструктурний підрядник	перевірка поєднання масштабу, мобільності, цифрового контролю, екологічного й кадрового ризику
ТОВ «Моноліт Будсервіс»	генеральний підрядник житлового та нежитлового будівництва	інженерний / спеціалізований підрядник	перевірка технологічної спеціалізації, цифрової інтеграції та роботи ММСП у спільній шкалі
ТОВ «КАДОР ГРУПП»	девелопер і учасник управління нерухомістю	девелопер / замовник-координатор	перевірка фінансової стійкості, стейкхолдерної координації та довгострокової проєктної спроможності
ТОВ «Київська енергетична будівельна компанія»	спеціалізований інженерний підрядник енергетичної інфраструктури та автоматизації	інженерний / спеціалізований підрядник	перевірка технологічної спеціалізації, цифрової інтеграції та роботи ММСП у спільній шкалі
ТОВ «СТОЛИЦЯ ГРУП»	девелопер і координатор інвестиційно-будівельних проєктів	девелопер / замовник-координатор	перевірка фінансової стійкості, стейкхолдерної координації та довгострокової проєктної спроможності
ТОВ «БК “Інтергал-Буд”»	девелопер і замовник-координатор житлового та змішаного будівництва	девелопер / замовник-координатор	перевірка фінансової стійкості, стейкхолдерної координації та довгострокової проєктної спроможності
ТОВ «ЕКОБУДОСНОВА»	малий підрядник житлового і нежитлового будівництва з інжиніринговими функціями	інженерний / спеціалізований підрядник	перевірка технологічної спеціалізації, цифрової інтеграції та роботи ММСП у спільній шкалі

Компонентні профілі підприємств за функціональними підсистемами Out1–Out5

№	Підприємство	Out1	Out2	Out3	Out4	Out5
1	ТОВ «ПБГ “Ковальська”»	0,679	0,863	0,745	0,805	0,820
2	ПрАТ «Івано-Франківськцемент»	0,834	0,838	0,768	0,770	0,858
3	ТОВ «ГК “Автострада”»	0,689	0,750	0,662	0,775	0,875
4	ПрАТ «ВІПЦЕМ»	0,567	0,805	0,695	0,725	0,768
5	ТОВ «Автомагістраль-Південь»	0,663	0,712	0,762	0,762	0,863
6	ТОВ «СТРУКТУМ»	0,637	0,750	0,568	0,675	0,775
7	ТОВ «Ательє де Франс Київ»	0,780	0,588	0,568	0,640	0,740
8	ТОВ «Онур Конструкціон Інтернешнл»	0,434	0,700	0,712	0,775	0,812
9	ТОВ «ФЕРРОСТРОЙ»	0,540	0,740	0,495	0,568	0,655
10	ТОВ «ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ»	0,592	0,588	0,563	0,603	0,668
11	ПП «Будівельна корпорація “РІЕЛ”»	0,458	0,748	0,575	0,600	0,613
12	ТОВ «ЕСТЕТ БУД КОМ»	0,735	0,453	0,570	0,530	0,560
13	ТОВ «ГРУПА СМАРТ»	0,483	0,438	0,475	0,575	0,575
14	ТОВ «Ростдорстрой»	0,391	0,588	0,487	0,688	0,637
15	ТОВ «ПРОБУДТРАНС»	0,590	0,430	0,443	0,625	0,600
16	ТОВ «Моноліт Будсервіс»	0,463	0,512	0,557	0,485	0,485
17	ТОВ «КАДОР ГРУПП»	0,420	0,538	0,475	0,600	0,600
18	ТОВ «Київська енергетична будівельна компанія»	0,333	0,863	0,737	0,700	0,725
19	ТОВ «СТОЛИЦЯ ГРУП»	0,356	0,630	0,650	0,600	0,668
20	ТОВ «БК “Інтергал-Буд”»	0,320	0,613	0,558	0,675	0,663
21	ТОВ «ЕКОБУДОСНОВА»	0,380	0,413	0,487	0,545	0,400

Паралельне ранжування підприємств за інтегральним, фінансовим і біосферосумісним контурами

Підприємство	Ранг IDEM	Ранг Out1	Ранг Out3	Δ рангів Out1– Out3	Аналітичний висновок
ТОВ «ПБГ “Ковальська”»	1	5	3	2	відносно узгоджені часткові позиції
ПрАТ «Івано-Франківськцемент»	2	1	1	0	відносно узгоджені часткові позиції
ТОВ «ГК “Автострада”»	3	4	7	3	відносно узгоджені часткові позиції
ПрАТ «ВІПЦЕМ»	4	10	6	4	відносно узгоджені часткові позиції
ТОВ «Автомагістраль-Південь»	5	6	2	4	відносно узгоджені часткові позиції
ТОВ «СТРУКТУМ»	6	7	11	4	відносно узгоджені часткові позиції
ТОВ «Ательє де Франс Київ»	7	2	12	10	виражена асиметрія фінансової та біосферосумісної позицій
ТОВ «Онур Конструкціон Інтернешнл»	8	15	5	10	виражена асиметрія фінансової та біосферосумісної позицій
ТОВ «ФЕРРОСТРОЙ»	9	11	16	5	суттєва різниця часткових позицій
ТОВ «ЛЕВ ДЕВЕЛОПМЕНТ»	10	8	13	5	суттєва різниця часткових позицій
ПП «Будівельна корпорація “РІЕЛ”»	11	14	9	5	суттєва різниця часткових позицій
ТОВ «ЕСТЕТ БУД КОМ»	12	3	10	7	суттєва різниця часткових позицій
ТОВ «ГРУПА СМАРТ»	13	12	19	7	суттєва різниця часткових позицій
ТОВ «Ростдорстрой»	14	17	18	1	відносно узгоджені часткові позиції
ТОВ «ПРОБУДТРАНС»	15	9	21	12	виражена асиметрія фінансової та біосферосумісної позицій
ТОВ «Моноліт Будсервіс»	16	13	15	2	відносно узгоджені часткові позиції
ТОВ «КАДОР ГРУПП»	17	16	20	4	відносно узгоджені часткові позиції
ТОВ «Київська енергетична будівельна компанія»	18	20	4	16	виражена асиметрія фінансової та біосферосумісної позицій
ТОВ «СТОЛИЦЯ ГРУП»	19	19	8	11	виражена асиметрія фінансової та біосферосумісної позицій
ТОВ «БК “Інтергал-Буд”»	20	21	14	7	суттєва різниця часткових позицій
ТОВ «ЕКОБУДОСНОВА»	21	18	17	1	відносно узгоджені часткові позиції

Таблиця Ж.5

Діагностика обмежувальних складових і пріоритетних управлінських дій

Підприємство	Мінімальна оцінка	Обмеження	Рівень IDEM	Пріоритетна управлінська дія
ТОВ «ПБГ “Ковальська”»	0,679	Out1	Випереджальний	Підвищити віддачу капіталу та фінансову результативність, зберігаючи високі цифрово-екологічні параметри.
ПрАТ «Івано-Франківськцемент»	0,768	Out3	Випереджальний	Поглибити декарбонізацію, ресурсоефективність, LCA та контроль вуглецевої інтенсивності.
ТОВ «ГК “Автострада”»	0,662	Out3	Стійкий	Посилити LCA/LCC, вуглецеві KPI і цифрову простежуваність екологічних даних.
ПрАТ «ВІЩЕМ»	0,567	Out1	Стійкий	Підвищити прибутковість і грошовий потік зі збереженням траєкторії декарбонізації.
ТОВ «Автомагістраль-Південь»	0,663	Out1	Стійкий	Підвищити ROA та якість грошових потоків, уніфікувати ESG-дані у проектному контурі.
ТОВ «СТРУКТУМ»	0,568	Out3	Стійкий	Поглибити LCA/LCC, вуглецевий облік, простежуваність ресурсів і екологічних доказів для енергетичних проєктів.
ТОВ «Ательє де Франс Київ»	0,568	Out3	Стійкий	Формалізувати LCA/LCC, облік відходів, простежуваність реставраційних матеріалів та екологічні докази.
ТОВ «Онур Конструкціон Інтернешнл»	0,434	Out1	Достатній	Знизити боргове навантаження, підвищити фінансову автономію та ліквідність.
ТОВ «ФЕРРОСТРОЙ»	0,495	Out3	Достатній	Посилити екологічний due diligence, облік відходів і викидів, LCA та контроль промислового впливу.
ТОВ «ЛІВ ДЕВЕЛОПМЕНТ»	0,563	Out3	Достатній	Розширити LCA/EPD, ресурсну простежуваність та екологічні критерії закупівель.
ПП «Будівельна корпорація “РІЕЛ”»	0,458	Out1	Достатній	Посилити фінансову стійкість, контроль грошових потоків і резервування проєктних ресурсів.
ТОВ «ЕСТЕТ БУД КОМ»	0,453	Out2	Достатній	Запровадити CDE/BIM/ERP, правила управління даними та розвиток цифрових компетентностей.
ТОВ «ГРУПА СМАРТ»	0,438	Out2	Достатній	Розвинути CDE/BIM, врядування даними, автоматизацію та цифрові компетентності.
ТОВ «Ростдорстрой»	0,391	Out1	Достатній	Відновити власний капітал, скоротити боргове навантаження та підвищити операційну прибутковість.
ТОВ «ПРОБУДТРАНС»	0,430	Out2	Достатній	Цифровізувати документообіг і управління даними; формалізувати облік відходів та екологічну відповідність.
ТОВ «Моноліт Будсервіс»	0,463	Out1	Достатній	Знизити боргове навантаження, підвищити фінансову автономію та стабілізувати кадрово-проєктний контур.
ТОВ «КАДОР ГРУПП»	0,420	Out1	Достатній	Підвищити фінансову резильєнтність, прибутковість і дисципліну фінансування проєктів.

Підприємство	Мінімальна оцінка	Обмеження	Рівень IDEM	Пріоритетна управлінська дія
ТОВ «Київська енергетична будівельна компанія»	0,333	Out1	Достатній	Підвищити автономію, ліквідність і керованість боргового навантаження.
ТОВ «СТОЛИЦЯ ГРУП»	0,356	Out1	Перехідний	Стабілізувати фінансування, контролювати проєктний cash-flow та інвестиційні зобов'язання.
ТОВ «БК “Інтергал-Буд”»	0,320	Out1	Перехідний	Посилити капітальну стійкість, ліквідність і довгострокове фінансування девелоперських проєктів.
ТОВ «ЕКОБУДОСНОВА»	0,380	Out1	Перехідний	Капіталізація й відновлення ліквідності як передумова цифрово-екологічної модернізації.

Таблиця Ж.6

Розподіл підприємств за директивними рівнями моделі IDEM

Діапазон	Рівень	Кількість	Частка, %	Управлінська інтерпретація
0,80–1,00	Випереджальний	2	9,5	готовність до інтегровальних і координаційних функцій
0,65–0,79	Стійкий	5	23,8	готовність підтверджена; локальне посилення найслабшої складової
0,50–0,64	Достатній	11	52,4	участь за контрольних показників і погодженої програми розвитку
0,35–0,49	Перехідний	3	14,3	усунення структурних дисбалансів і повторне оцінювання
0,00–0,34	Критичний	0	0,0	обмеження відповідальної ролі до виконання стабілізаційних заходів

Середнє значення вихідного інтегрального індексу IDEM за вибіркою – 0,594; медіана – 0,545, Середні значення функціональних підсистем: Out1 – 0,540; Out2 – 0,646; Out3 – 0,598; Out4 – 0,653; Out5 – 0,684,

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Онофрійчук О. П.** Бізнес-моделі управління підприємствами в умовах цифрової трансформації економіки: монографія. Київ: ПП «Сердюк В. Л.», 2026. 478 с.

2. Reznik, N., Gonchar, V., Kalinin, O., **Onofriichuk, O.**, & Datsiuk, P. (2025). Application of resource-saving technologies in the production activities of the food industry in Ukraine. In *The future of work: How technology is transforming jobs and skills. Studies in Systems, Decision and Control* (Vol. 291, pp. 485–497). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87372-0_42 (**Scopus, Q4**). (розділ в іноземній монографії) (71,05/0,81/0,16 д.а.) *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано засади впровадження ресурсозберігаючих технологій у діяльність підприємств-стейкхолдерів з урахуванням вимог біосферосумісності для оптимізації ресурсоспоживання та підвищення організаційно-інноваційної стійкості.*

Статті у наукових виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science:

3. Trach, R., Chupryna, I., Tormosov, R., Leshchynsky, V., Trach, Y., Ryzhakova, G., Ratnikov, D., & **Onofriichuk, O.** (2026). Decision Support Framework for Post-War Infrastructure Revitalization Using a Hybrid Fuzzy–Simulation–ANN Model. *Applied Sciences*, 16(9), 4364. <https://doi.org/10.3390/app16094364> (**Scopus, Q1**). (1,44/ 0,18 д.а.) *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано засади застосування гібридної нечіткої імітаційної нейромережевої моделі для оцінювання організаційно-інноваційної стійкості та біосферосумісної ефективності підприємств-стейкхолдерів у процесах повоєнного відновлення інфраструктури.*

4. Kalinin, O., Gonchar, V., Abliazova, N., Filipishyna, L., **Onofriichuk, O.**, & Maltsev, M. (2024). Enhancing economic security through digital transformation in investment processes: Theoretical perspectives and methodological

approaches integrating environmental sustainability. *Natural and Engineering Sciences*, 9(1), 26–45. <https://doi.org/10.28978/nesciences.1469858> (**Scopus, Q3**). (1,25 / 0,21 д.а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано засади інтеграції вимог екологічної стійкості (біосферосумісності) в економіко-цифрові моделі управління інвестиційними процесами підприємств-стейкхолдерів для забезпечення їхньої економічної безпеки.*

5. Golovchenko, O., Saiensus, M., Sorokoumov, G., **Onofriichuk, O.**, Zubko, O., & Liu, L. (2022). Management of efficiency and competitiveness of enterprises. *Economic Affairs* (New Delhi), 67(3), 317–326. <https://doi.org/10.46852/0424-2513.3.2022.24> (**Scopus, Q4**). 0,85 / 0,14 д.а.). *Особистий внесок здобувача: розроблено організаційно-економічні принципи забезпечення конкурентоспроможності підприємств-стейкхолдерів та обґрунтовано інструментарій контролінгу для узгодження інтересів в умовах глобальної невизначеності й переходу до нових економіко-цифрових моделей управління.*

Статті у наукових періодичних виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України

6. **Онофрійчук О. П.** Інтелектуальне моделювання ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами. *Вісник Східноєвропейського університету економіки і менеджменту*. 2026. № 1 (35). Том 2. С. 470-484. [https://doi.org/10.58253/2078-1628-2026-1-2\(35\)-031](https://doi.org/10.58253/2078-1628-2026-1-2(35)-031) (0,94 д.а.)

7. Kalinin, O., & **Onofriichuk, O.** (2026). Institutional mechanism for shaping the eco-oriented corporate culture of construction enterprises. *Economic Innovations*, 28(2(99)), 66-77. [https://doi.org/10.31520/ei.2026.28.2\(99\).66-77](https://doi.org/10.31520/ei.2026.28.2(99).66-77) (0,95 / 0,48 д.а.). *Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні інституційних рівнів та механізмів трансляції екологічних норм у корпоративне управління. Це формує нормативно-ціннісний базис, зокрема екоорієнтовану корпоративну культуру, для забезпечення організаційно-інноваційної стійкості підприємств-стейкхолдерів у межах функціонування економіко-цифрових моделей біосферосумісного будівництва.*

8. **Онофрійчук, О. П.** (2026). Онтологічні засади цифрової трансформації будівельної галузі. *Економічний вісник Донбасу*, 2(84), 187–195. [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2026-2\(84\)-187-195](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2026-2(84)-187-195) (0,85 д.а)
9. Клімова, І. О., **Онофрійчук, О. П.**, & Ткачук, М. В. (2026). Аналіз використання алгоритмів машинного навчання для передбачення купівельних звичок та їх вплив на ефективність маркетингових кампаній. *Актуальні питання економічних наук*, 1, 1–20. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19489031> (0,7 / 0,23 д.а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано методологічні засади застосування алгоритмів машинного навчання в економіко-цифрових моделях управління для інтелектуальної підтримки прийняття рішень, прогнозування поведінки учасників (стейкхолдерів) екосистеми та підвищення організаційно-інноваційної стійкості підприємств шляхом багатофакторного аналізу великих даних.*
10. Близнюк, С. В., & **Онофрійчук, О. П.** (2026). Персоналізований маркетинг у цифровому середовищі: виклики та можливості. *Наукові записки Львівського університету бізнесу та права*, 48, 4–15. <https://doi.org/10.66556/2663-0117.48.blyzniuk-s> (0,9 / 0,45 д.а.). *Особистий внесок здобувача: розроблено підходи до систематизації викликів індивідуалізованих комунікацій та обґрунтовано механізми інтеграції омніканальних стратегій в економіко-цифрові екосистеми управління підприємствами-стейкхолдерами для підвищення їхньої організаційно-інноваційної стійкості, оптимізації роботи з даними та управління інформаційними ризиками.*
11. Коваль, В. В., Камінський, О. Є., Редьква, О. З., **Онофрійчук, О. П.**, & Капранова, Л. Г. (2025). Цифрові платформи управління як інструмент трансформації та підвищення економічної безпеки підприємств. *Проблеми економіки*, 3, 176–185. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2025-3-176-185> (1,0 / 0,2 д. а.). *Особистий внесок здобувача: розроблено концептуальні засади формування цифрових платформ в межах економіко-цифрових екосистем підприємств-стейкхолдерів, обґрунтовано застосування мультиагентного*

економіко-математичного моделювання для підвищення організаційно-інноваційної стійкості та керованості ризиками в умовах макроекономічної невизначеності.

12. **Онофрійчук, О. П.** (2025). Економіко-цифрові моделі управління будівельними підприємствами. *Академічні візії*, (50). <https://doi.org/10.5281/zenodo.18102355> (0,8 д.а.).

13. **Onofriichuk, O.** (2025). The formation of resilience in construction enterprises under digital transformation. *Economic Bulletin of Donbas*, 4(82), 115–123. [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2025-4\(82\)-115-123](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2025-4(82)-115-123) (0,9 д.а.)

14. Коваль, В. В., **Онофрійчук, О. П.**, Капталан, С. М., Гончарова, І. М., & Локаєць, М. М. (2025). Управління розвитком інтелектуально-технологічного капіталу та персоналу підприємства в умовах цифрової трансформації. *Бізнес Інформ*, 9, 160–168. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2025-9-160-168> (0,85 / 0,17 д.а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано механізми управління інтелектуально-технологічним капіталом та адаптації персоналу як ключових факторів забезпечення стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості й організаційно-інноваційної стійкості підприємств-стейкхолдерів в умовах впровадження економіко-цифрових моделей управління.*

15. **Онофрійчук, О. П.** (2025). Управління стейкхолдер-екосистемою підприємства в проєктах біосферосумісного виробництва. *Вісник Східноєвропейського університету економіки і менеджменту*, 2(34), 435–449. [https://doi.org/10.58253/2078-1628-2025-2\(34\)-030](https://doi.org/10.58253/2078-1628-2025-2(34)-030) (0,94 д.а.).

16. **Онофрійчук, О. П.** (2025). Інституційні бар'єри та дисфункції впровадження ESG-принципів у цифрових моделях управління. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*, 348(6), 526–532. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-348-6-76> (0,85 д.а.)

17. **Онофрійчук, О. П.** (2025). Методологічні засади оцінювання ефективності економіко-цифрових моделей управління проєктами

біосферосумісного будівництва. *Український журнал прикладної економіки та техніки*, 10(4), 172–176. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-4-33> (0,45 д.а.)

18. **Онофрійчук, О. П.**, Авдейчик, О. М., Гребень, Е. І., Бригідир, П. В., Кушнірук, О. Ю., Малеш, С. В., & Веремчук, І. І. (2025). Проблеми розвитку соціально-економічної безпеки в Україні: Виклики та можливості. *Національні інтереси України*, 10(15), 881–893. [https://doi.org/10.52058/3041-1793-2025-10\(15\)-881-893](https://doi.org/10.52058/3041-1793-2025-10(15)-881-893) (0,8 / 0,11 д.а.). *Особистий внесок: досліджено інституційні та макроекономічні чинники соціально-економічної безпеки, що формують зовнішнє середовище функціонування підприємств-стейкхолдерів і визначають базові обмеження для впровадження економіко-цифрових моделей управління проєктами біосферосумісного будівництва*

19. **Онофрійчук, О. П.**, Авдейчик, О. М., Бригідир, П. В., Кушнірук, О. Ю., Малеш, С. В., & Веремчук, І. І. (2025). Економічна безпека: теоретико-методологічний аналіз. *Суспільство та національні інтереси*, 10(18), 606–615. [https://doi.org/10.52058/3041-1572-2025-10\(18\)-606-615](https://doi.org/10.52058/3041-1572-2025-10(18)-606-615) (0,6 / 0,1 д.а.). *Особистий внесок здобувача: досліджено теоретико-методологічні засади економічної безпеки як базису, що визначає інституційно-ризиковий контур макросередовища, створюючи граничні обмеження та виклики для забезпечення організаційно-інноваційної стійкості підприємств-стейкхолдерів у межах економіко-цифрових моделей управління.*

20. **Онофрійчук, О. П.**, Ліщук, Н. В., Далюк, Н. Я., Бригідир, П. В., & Соколовський, Д. І. (2024). Теоретичні основи соціально-економічної безпеки. *Актуальні питання у сучасній науці*, 6(24), 131–142. [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-6\(24\)-131-142](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-6(24)-131-142) (0,6 / 0,12 д.а.). *Особистий внесок здобувача: досліджено макроекономічні, інституційні та соціальні передумови формування соціально-економічної безпеки, що визначають зовнішнє середовище функціонування підприємств-стейкхолдерів і формують базові обмеження для їхньої стійкості в умовах екосистемних трансформацій*

21. **Онофрійчук, О. П., Яковчук, А., & Сисюк, В. І. (2024).** Теоретичні основи економічної безпеки. *Наука і техніка сьогодні*, 2(30), 375–387. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-2\(30\)-375-387](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-2(30)-375-387) (0,7 / 0,23 д.а.). *Особистий внесок здобувача: систематизовано теоретико-методологічні засади економічної безпеки як макросередовища, що визначає інституційно-правові рамки, зовнішні ризики та граничні обмеження для забезпечення організаційно-інноваційної стійкості підприємств-стейкхолдерів в умовах кризових явищ.*
22. **Онофрійчук, О. П., Коваль, Л. А., Тимчук, Б. П., Підгрушний, В. А., Гордійчук, О. Ю., & Авдейчик, О. М. (2024).** Роль та значення фінансового моніторингу у банківській діяльності. *Національні інтереси України*, 4(4), 361–369. [https://doi.org/10.52058/3041-1793-2024-4\(4\)-361-369](https://doi.org/10.52058/3041-1793-2024-4(4)-361-369) (0,6 / 0,1 д.а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано механізми інформаційно-аналітичного забезпечення та управління фінансовими ризиками, що формують зовнішній інституційний контур доказовості та впливають на стійкість фінансових потоків підприємств-стейкхолдерів в умовах цифровізації екосистемної взаємодії.*
23. **Онофрійчук, О. П., Коваль, Л. А., Яковлєв, В. Ю., Підгрушний, В. А., Семенюк, В. П., & Авдейчик, О. М. (2024).** Фінансово-економічна безпека підприємства: проблеми та забезпечення в умовах війни. *Наукові інновації та передові технології*, 11(39), 980–989. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-11\(39\)-980-988](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-11(39)-980-988) (0,5 д.а. / 0,1 д.а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано механізми антикризового управління фінансовими ризиками та інструменти оцінювання ліквідності, що формують базовий економіко-безпековий контур організаційно-інноваційної стійкості підприємств-стейкхолдерів в умовах макроекономічної нестабільності.*
24. **Онофрійчук, О. П., Медведєв, І. І., Сокол, О. А., Підгрушний, В. А., Серветник, М. А., & Авдейчик, О. М. (2024).** Фінансова безпека держави. *Наукові інновації та передові технології*, 12(40), 765–776. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-12\(40\)-765-776](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-12(40)-765-776) (0,75 / 0,13 д.а.).

Особистий внесок здобувача: систематизовано макроекономічні детермінанти та загрози фінансовій безпеці держави, які формують зовнішній ризиковий контур і визначають граничні інституційні обмеження для побудови резильєнтних економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами в умовах глобальної та внутрішньої нестабільності.

25. **Онофрійчук, О. П., & Близнюк, С. В. (2023).** Інтернет-маркетинг в Україні: передумови виникнення, особливості становлення, перспективи розвитку. *Актуальні питання у сучасній науці*, 12(18), 122–131. [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2023-12\(18\)-122-131](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2023-12(18)-122-131) (0,6 / 0,3 д.а.). *Особистий внесок здобувача: систематизовано інструменти інтернет-маркетингу та цифрової взаємодії зі споживачами, що застосовано при описі комунікаційного контуру економіко-цифрових моделей управління підприємствами-стейкхолдерами в екосистемному середовищі.*

26. **Онофрійчук, О. П., Антонюк, С. І., & Підгрушний, В. А. (2023).** Управління фінансовою стійкістю підприємства. *Актуальні питання у сучасній науці*, 12(18), 112–121. [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2023-12\(18\)-112-121](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2023-12(18)-112-121) (0,6 / 0,2 д.а.). *Особистий внесок здобувача: систематизовано інструментарій фінансового контролінгу, управління капіталом та податкового планування як ключових внутрішніх чинників забезпечення організаційно-інноваційної стійкості підприємств-стейкхолдерів в умовах макроекономічної нестабільності.*

27. **Онофрійчук, О. П., Близнюк, С. В., & Сисюк, В. І. (2023).** Теоретичні аспекти кредитної політики комерційних банків. *Наукові інновації та передові технології*, 14(28), 718–728. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-14\(28\)-718-728](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-14(28)-718-728) (0,6 д.а. / 0,2 д.а.). *Особистий внесок здобувача: систематизовано теоретико-методологічні засади кредитної політики фінансових установ як елемента інституційного макросередовища, що детермінує доступність інвестиційних ресурсів і граничні обмеження для забезпечення фінансової стійкості підприємств-стейкхолдерів.*

28. **Онофрійчук, О. П.** (2022). Еволюція парадигми управління будівельними підприємствами. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, 2(49), 346–359. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).346-359](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).346-359) (0,8 д.а.)

Матеріали конференцій, де здійснено апробацію роботи:

29. Reznik, N., Tryhubchenko, A., Gonchar, V., Kalinin, O., Onikiienko, N., & **Onofriichuk, O.** (2026). The effect of price risk impact on entrepreneurial structures depending on their size. In Digital horizons: Reimagining business in the tech era: Proceedings of ICBT 2025, Volume 2 (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1570, pp. 347–356). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00329-4_31 (Scopus, Q4). (0,63/ 0,1 д.а.) *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано механізми оцінювання впливу цінових ризиків на діяльність підприємств-стейкхолдерів різного масштабу для підвищення їхньої економічної стійкості та розроблення адаптивних систем управління у межах реалізації проєктів біосферосумісного будівництва.*

30. **Онофрійчук О. П., Васильчук Є.** Штучний інтелект у цифровій економіці: ефективність, загрози та виклики. *Інновації партнерської взаємодії освіти, економіки та соціального захисту в умовах інклюзії та прагматичної реабілітації соціуму: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції.* (м. Кам'янець-Подільський, 21-22 травня 2026 р.). С. 414 -415. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування регуляторних і корпоративних передумов відповідального використання ІІІ в цифровій економіці.*

31. **Онофрійчук О. П.** Адаптивна алокація ризиків між підприємствами-стейкхолдерами у цифровій екосистемі будівельного проєкту. *Міжнародні тенденції та перспективи розвитку в освіті та науці в умовах глобалізації: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції до 100-річчя академіка Степана Дем'янчука* (м. Рівне, 13 листопада 2025 р.). Рівне, 2025. С. 311–314.

32. Laktionova, O., Ismailov, T., Kalinin, O., Gonchar, V., & **Onofriichuk, O.** (2024). Digitalization and management of crypto assets as a source of investment for “green” projects. *E3S Web of Conferences*, 558, Article 01028.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455801028>, eISSN: 2267-1242, (**Scopus, Q4**) (0,59 д. а. / 0,12 д. а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано умови використання цифрових фінансових активів як додаткового джерела фінансування екологічно орієнтованих проєктів.*

33. Мекіса, Ю. О., & **Онофрійчук, О. П.** (2024). Вплив цифрової трансформації на досягнення цілей сталого розвитку в закладах соціальної сфери. *Соціальне забезпечення та соціальна робота в умовах сучасних викликів: Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції, (15 листопада 2024 року, м. Хмельницький). С. 41–43. (0,2 / 0,1 д.а.).* *Особистий внесок здобувача: визначено напрями інтеграції цифрових технологій у реалізацію цілей сталого розвитку, що стало концептуальним підґрунтям для поєднання цифрової зрілості, екологічної результативності та стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості в оцінюванні економіко-цифрового управління.*

34. Ліщук, Н. В., Близнюк, С. В., Попик, Ю. І., Авдейчик, О. М., & **Онофрійчук, О. П.** (2024). Аналіз причин бюджетного дефіциту та його наслідки для національної економіки країни. *Contemporary Challenges of Society and Ways to Overcome Them: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, Tallinn, Estonia, January 30–February 2, 2024 P. 54–57. (0,2 / 0,04 д.а.).* *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано причинно-наслідкові зв'язки між бюджетним дефіцитом, зміною параметрів макроекономічної стійкості та фінансовими обмеженнями суб'єктів господарювання, що враховано під час формування сценарно-аналітичних положень оцінювання стійкості підприємств-стейкхолдерів.*

35. **Онофрійчук, О. О.** Контурно-шлюзовий підхід до оцінювання ефективності економіко-цифрових моделей управління у проєктах біосферосумісного будівництва. *Актуальні проблеми та перспективи розвитку регіонів: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (м. Рівне, 23 червня 2023 р.). Рівне : РВЦ МЕГУ ім. акад. С. Дем'янчука, 2023. С. 53-56. (0,28 д.а.)*

36. Бережницька, В. Д., Ільчук, К. В., & **Онофрійчук, О. П.** (2022). Вплив процесу глобалізації на систему оподаткування як складову інституційного середовища. *Актуальні проблеми економіки, фінансів, обліку та права в XXI столітті: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції*, (Полтава, 15 квітня 2022 року). Полтава, 2022. С. 21–23). ЦФЕНД. (0,2 д.а. / 0,7 д.а.). *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано напрями трансформації податкового регулювання під впливом глобалізаційних процесів, що стало підґрунтям для врахування інституційних вимог і регуляторних обмежень у формуванні інституційно-ризикового контуру економіко-цифрового управління підприємствами-стейкхолдерами.*

37. Ліщук Н. В., **Онофрійчук О. П.**, Близнюк С. В., Сторожук В. В., Шеверда Л. Л. (2022). Валютне регулювання експортних та імпорتنих операцій суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності. *Actual Priorities of Modern Science, Education and Practice: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference*, (Paris, France, March 29–April 1, 2022). pp. 200–205. (0,4 д.а. / 0,08 д.а.). *Особистий внесок здобувача: систематизовано інструменти валютного регулювання експортно-імпорتنих операцій та визначено їхній вплив на фінансову стійкість підприємств, що використано під час обґрунтування зовнішніх ризиків, фінансових обмежень і адаптивних управлінських рішень у діяльності підприємств-стейкхолдерів.*

38. Коваль, Л. А., Ліщук, Н. В., Козак, С. В., Лук'янчук, Ю. Ф., & **Онофрійчук, О. П.** (2022). Німецьке економічне диво. *Multidisciplinary Academic Research, Innovation and Results: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference*, (Prague, Czech Republic, April 5–8, 2022). pp. 197–205. (0,4 д.а. / 0,08 д.а.). *Особистий внесок здобувача: узагальнено інституційні, інвестиційні та організаційні чинники повоєнного відновлення економіки Німеччини, що сформувало аналітичне підґрунтя для визначення умов стійкого відновлення підприємств і розвитку проєктних екосистем у період структурних трансформацій.*

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати:

39. Артюшок, К. А., Гончаров, Ю. В., Артюшок, В. С., Ліщук, Н. В., **Онофрійчук, О. П., & Шпотюк, А. М.** (2025). Адаптація системи управління еколого-економічними відносинами до умов інноваційної економіки: монографія. Рівне: Ю. Кукса, 2025. 490 с.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.17201728> *Особистий внесок здобувача: обґрунтовано напрями адаптації управління еколого-економічними відносинами до цифрових та інноваційних змін.*

16 травня 2024 року № 05-16/24

ГРОМАДСЬКА ОРГАНІЗАЦІЯ «НЕРІО»

ДОВІДКА
про практичне використання результатів наукового дослідження

У практиці експертно-аналітичного супроводу містобудівних ініціатив використано окремі результати наукового дослідження Онофрійчука Олега Петровича за темою «Економіко-цифрові моделі управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва».

Під час громадського моніторингу проєктів відбудови застосовано положення концептуально-методологічної платформи економіко-цифрового управління та моделі динамічної взаємодії стейкхолдерів. На їх основі інституційні й екологічні вимоги зіставлялися з даними про склад учасників, розподіл відповідальності, проєктні ризики та очікувані результати.

У процесі проведення експертизи містобудівних ініціатив ГО «Неріо» активно використовує запропоновану автором модель динамічного управління екосистемою підприємств-стейкхолдерів через поєднання контурів ідентифікації учасників, узгодження інтересів, спільного прийняття рішень та цифрової доказовості.

Практичне використання розробок сприяло уніфікації експертних процедур, підвищенню доказовості висновків і чіткішому обґрунтуванню зауважень до містобудівних рішень.

Керівник ГО «Неріо»



Філімончук Анастасія Олегівна

№ 02-19/26

**ТОВ «ПРОБУДТРАНС»
ДОВІДКА****про впровадження результатів наукового дослідження**

Методичні результати дослідження Онофрійчука Олега Петровича за темою «Економіко-цифрові моделі управління підприємствами-стейхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва» використано для вдосконалення транспортно-логістичного забезпечення будівельних проєктів.

Методологічний конструкт стійкості та резильєнтності покладено в основу оцінювання здатності логістичної системи передбачати порушення, реагувати на них і відновлювати постачання. Механізм адаптивної алокації ризиків застосовано для розмежування відповідальності за достовірність даних, виконання коригувальних заходів і формування резервів. Це дало змогу пов'язати логістичні рішення з фактичними змінами параметрів будівельного проєкту.

Практичний результат полягав у підвищенні керованості постачань, скороченні часу реагування на відхилення та чіткішому розподілі відповідальності між перевізником, підрядником і замовником.

Директор

М. П.



Хвезай А.Б.

« 19 » лютого 2026 р.

№ 12-11/25

**ПМПФ «СПЕЦРЕМБУД»
АКТ**

**впровадження результатів наукового дослідження в операційну
діяльність**

У процесах планування капітального ремонту будівель і відновлення інженерних мереж ПМПФ «СПЕЦРЕМБУД» апробовано науково-методичні результати дослідження Онофрійчука Олега Петровича «Економіко-цифрові моделі управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва».

Сценарно-аналітичну технологію оцінювання стійкості на основі моделі IDEM застосовано для визначення критичних поєднань параметрів, допустимих меж відхилень і пріоритетних коригувальних заходів. Формування карт відповідальності здійснювалося за ланцюгом «вимога – правило – дані – ризик – рішення – результат».

За даними підприємства, використання запропонованих положень підвищило точність планування та сприяло зниженню непередбачених витрат на 11,4 %.

Директор



_____ Кучерук О.А.

« 11 » грудня 2025 р.

№ 09-18/25

ТОВ «ЕКОБУДОСНОВА»
ДОВІДКА

щодо використання результатів наукового дослідження

Науково-методичні положення, одержані Онофрійчуком Олегом Петровичем за результатами дослідження «Економіко-цифрові моделі управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва», використано при організації робіт нульового циклу та геотехнічному супроводі об'єктів.

Онтологічну архітектуру економіко-цифрового управління застосовано для структурованого опису геотехнічних процесів, ролей виконавців, контрольних правил і даних про приховані роботи. Індикативно-критеріальна система дала змогу включити до виробничого контролю обмеження, пов'язані зі станом ґрунтів і гідрогеологічним режимом території.

Використання розробок підвищило керованість геотехнічних ризиків, упорядкувало документування прихованих робіт і посилило доказовість дотримання екологічних вимог.

Директор



 _____ Гульчук І.О.

« 18 » вересня 2025 р.



Товариство з обмеженою відповідальністю фірма «Екорембуд ЛТД»

Код ЄДРПОУ 13977647
ІПН 139776417122
вул.Промислова, 1, с. В. Олексин
Рівненської обл., Україна, 35302

вул. Буковинська, 7а, м. Рівне,
Рівненської обл., Україна, 33027
www.ecorembud.com.ua
e-mail: vtv.ecorembud@gmail.com

17 вересня 2024 року № 09-17/24

АКТ впровадження науково-прикладних розробок у виробничу діяльність

У виробничо-управлінські процеси ТзОВ ФІРМА «ЕКОРЕМБУД ЛТД» упроваджено результати наукового дослідження Онофрійчука Олега Петровича «Економіко-цифрові моделі управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва». Розробки використано під час підготовки та виконання робіт з екологічної реконструкції будівель.

Для впорядкування виробничого контролю застосовано онтологічну архітектуру економіко-цифрового управління, що забезпечила узгоджений опис активів, процесів, ресурсів, правил і показників. Положення щодо оцінювання життєвого циклу використано при виборі будівельних матеріалів, зіставленні їх вартості, експлуатаційних характеристик і впливу на довкілля. Такий порядок дав змогу враховувати вимоги біосферосумісного будівництва не після завершення робіт, а на етапах формування технічних і кошторисних рішень.

Запровадження науково-прикладних положень сприяло підвищенню контрольованості ресурсоспоживання, скороченню неузгодженостей у виробничих даних і підвищенню обґрунтованості застосування екологічно безпечних матеріалів. Отримані результати використовуються під час підготовки управлінських рішень щодо реконструкції та модернізації об'єктів.

Генеральний директор



Юрій ВОЗНІЮК



тел.+38 077 7882288

12 лютого 2025 року № 02-12/25

ТОВ «ЕСТЕТ БУД КОМ»

ДОВІДКА
про використання результатів наукового дослідження

У системі цифрового планування та координації генпідрядних робіт ТОВ «ЕСТЕТ БУД КОМ» застосовано методичні положення, розроблені Онофрійчуком Олегом Петровичем у межах дослідження «Економіко-цифрові моделі управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва».

Функціональну модель цифрового забезпечення будівельного проєкту реалізовано через спільне середовище даних та інформаційну модель об'єкта. Індикативно-критеріальну систему оцінювання використано для зіставлення економічних, цифрових, екологічних та організаційних параметрів роботи підрядників.

Застосування зазначених положень поліпшило координацію учасників, забезпечило простежуваність управлінських рішень і дало змогу своєчасно виявляти відхилення від установлених параметрів проєкту.

Директор
ТОВ «ЕСТЕТ БУД КОМ»



Володимир КИРИЛЬЧУК



ТОВ "АРХПРОСТІР ПРО"

43016, Волинська область, місто Луцьк, вулиця Рієнська, будинок 76К, офіс 1
 Код ЄДРПОУ — 45383559
 р/р UA 91305299000002600000808904, в АТ КБ «ПРИВАТБАНК».

27 травня 2025 року № 05-27/25

ДОВІДКА

щодо впровадження результатів наукового дослідження

Під час архітектурного проєктування, інжинірингового супроводу та розроблення інформаційних моделей будівель ТЗОВ «АРХПРОСТІР ПРО» використано наукові результати Онофрійчука Олега Петровича за темою «Економіко-цифрові моделі управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва».

У проєкту практику інтегровано функціональну модель цифрового забезпечення, що поєднує BIM, спільне середовище даних, моніторинг показників та оцінювання життєвого циклу. Діагностико-рекомендаційний механізм IDEM застосовано для виявлення відхилень між технічними, вартісними, цифровими та екологічними параметрами. Результати оцінювання використовувалися при уточненні проєктних рішень і підготовці рекомендацій замовникам.

Упровадження розробок забезпечило узгодженість проєктної інформації, підвищило простежуваність змін та посилило обґрунтованість вибору конструктивних і технологічних рішень. Окремим результатом стало чіткіше врахування експлуатаційних витрат і екологічних наслідків на ранніх стадіях проєктування.

Т.в.о. директора



Андрій Довгун

ПРИВАТНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ
ЗАКЛАД "МІЖНАРОДНИЙ ЕКОНОМІКО-
ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
АКАДЕМІКА СТЕПАНА ДЕМ'ЯНЧУКА"
АДРЕСА: УКРАЇНА, 33027, М. РІВНЕ,
ВУЛ. АКАДЕМІКА СТЕПАНА ДЕМ'ЯНЧУКА, 4
ТЕЛ/ФАКС: +38 (0362) 63-50-85
КОД ЄДРПОУ 24171048
IBAN № UA763052990000026007030702590
АТ КБ «ПРИВАТБАНК»



PRIVATE HIGHER EDUCATION
ESTABLISHMENT "ACADEMICIAN
STEPAN DEMIANCHUK INTERNATIONAL
UNIVERSITY OF ECONOMICS AND
HUMANITIES"
ADDRESS: UKRAINE, 33027, RIVNE
ACADEMICIAN STEPAN DEMIANCHUK
STREET, 4
TEL/FAX +38 (0362) 63-50-85
CODE EDRPOU 24171048
IBAN UA763052990000026007030702590
JSC CB "PRIVATBANK"

E-mail: mail@megu.edu.ua

№ 14/26 від 14.04.2026 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження в освітній процес

Результати дисертаційного дослідження Онофрійчука Олега Петровича за темою «Економіко-цифрові моделі управління підприємствами-стейкхолдерами проєктів біосферосумісного будівництва» успішно впроваджено в освітній процес ПВНЗ "Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука" під час викладання навчальних дисциплін «Економічний аналіз» та «Фінансово-економічна безпека».

У межах вивчення дисципліни «Економічний аналіз» ефективно використано розроблену здобувачем індикативно-критеріальну систему оцінювання економіко-цифрового управління. Зокрема, імплементовано підходи щодо комплексного оцінювання економічної результативності, цифрової зрілості управління, екологічної та біосферосумісної ефективності, стейкхолдерно-людиноцентричної орієнтованості й організаційно-інноваційної стійкості діяльності підприємств-стейкхолдерів. На основі запропонованих підходів, що передбачають розмежування показників результату, процесу та доказовості з їх прив'язкою до фаз життєвого циклу проєкту, оновлено зміст практичних занять та аналітичних завдань. Це дозволило оптимізувати процеси формування часткових функціональних оцінок, виявлення структурних дисбалансів та наукового обґрунтування управлінських рішень здобувачами вищої освіти з урахуванням некомпенсаційних (ESG) критичних обмежень.

Під час викладання дисципліни «Фінансово-економічна безпека» успішно апробовано та застосовано авторські положення до діагностики економічної стійкості та резильєнтності підприємств як здатності зберігати функціональну цілісність, перебудовувати конфігурацію ресурсів та відновлювати проєктну спроможність після збурень. Навчально-методичний комплекс дисципліни доповнено прикладними ситуаційними завданнями на основі розробленого механізму адаптивної алокації ризиків, спрямованими на ідентифікацію критичних обмежень, вибір превентивних антикризових заходів і формування рішень для підтримання належного рівня фінансово-економічної безпеки. Також впроваджено концептуально-методологічну платформу еволюційного переходу до біосферосумісних економіко-цифрових моделей управління.

Впровадження зазначених науково-методичних результатів дисертаційної роботи (онтологічної архітекτονіки економіко-цифрового управління, індикативно-критеріальної системи оцінювання, моделі IDEM, положень щодо управління стейкхолдерами, стійкості й резильєнтності, ESG, адаптивної алокації ризиків, BIM, сценарного та нейромережевого моделювання) посилило прикладну спрямованість освітніх компонентів, поглибило аналітичну підготовку здобувачів вищої освіти та сприяло розвитку їхньої здатності комплексно оцінювати стан підприємства, ідентифікувати ризики його функціонування й генерувати обґрунтовані управлінські рішення в умовах цифрової трансформації економіки та повоєнного відновлення.

Ректор



Віталій ДЕМ'ЯНЧУК

АКТ
про впровадження результатів дисертаційного дослідження у практику
муніципального управління будівництвом

9 квітня 2026 року № 04-09/26

Засвідчуємо, що наукові, методологічні та практичні розробки дисертаційного дослідження Онофрійчука Олега Петровича успішно впроваджено в операційну діяльність Управління капітального будівництва виконавчого комітету Рівненської міської ради під час організації, фінансування та всебічного контролю процесів будівництва, реконструкції та капітального ремонту об'єктів муніципальної інфраструктури.

Розроблені автором моделі забезпечують надійний перехід до прозорого, керованого та біосферосумісного інвестування коштів територіальної громади.

У ході виконання функцій єдиного замовника нашим Управлінням знайдено глибоке практичне застосування для запропонованого автором діагностико-рекомендаційного механізму інтерпретації результатів IDEM. Під час проведення тендерних закупівель та моніторингу виконання договорів підряду цей механізм передбачає формування компонентного профілю управлінського стану компаній-учасників. Замість простого обмеження аналізу базовим рейтинговим значенням, впроваджений підхід надійно пов'язує виявлені відхилення безпосередньо з функціями і відповідальністю замовників, проєктувальників та підрядників. Це дає нам змогу визначати чіткі адресні заходи впливу та гарантувати безперервність виконання муніципальних контрактів.

Крім того, в організацію нагляду за міськими об'єктами інтегровано розроблену функціональну модель цифрового забезпечення стратегічних цілей проєктів біосферосумісного будівництва. Шляхом формування єдиного цифрового ядра на основі спільного середовища даних та інформаційної моделі об'єкта, Управління здійснює поточний моніторинг та жорсткий управлінський контроль. Застосування вказаних наукових розробок дозволило Управлінню суттєво підвищити ефективність використання бюджетних коштів.

Заступник начальника управління
 капітального будівництва



Анатолій МАТВІЙЧУК