

DOI: [https://doi.org/10.58253/2078-1628-2026-1-2\(35\)-031](https://doi.org/10.58253/2078-1628-2026-1-2(35)-031)**УДК** 005.21:004.89:69.003**JEL** C45, C63, L74, M10, O33, Q56**Олег Петрович ОНОФРІЙЧУК**

кандидат економічних наук, доцент,

декан економічного факультету,

кафедра економіки та фінансів,

ПВНЗ «Міжнародний економіко-гуманітарний університет

імені академіка Степана Демянчука»,

м. Рівне, Україна

 <http://orcid.org/0000-0002-8765-6656>onofriichuk.oleh@megu.edu.ua

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКОНОМІКО-ЦИФРОВОГО УПРАВЛІННЯ БУДІВЕЛЬНИМИ ПІДПРИЄМСТВАМИ

Анотація. У статті обґрунтовано методичний підхід до інтелектуального моделювання ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами. Визначено, що результативність такого управління не може зводитися лише до фінансових показників, оскільки цифровізація будівництва, вимоги ESG, розвиток BIM-орієнтованого управління, екологічна відповідальність, стейкхолдерна взаємодія та організаційна адаптивність формують єдину систему взаємозалежних управлінських параметрів. Запропоновано дворівневу нечітко-логічну модель оцінювання, фінальним результатом якої є інтегральний індекс IDEM (Integrated Digital-Economic Management Index). На нижньому рівні моделі виокремлено п'ять функціональних підсистем: економічну результативність підприємства, цифрову зрілість управління, екологічну та біосферосумісну ефективність, стейкхолдерно-людиноцентричну орієнтованість, організаційно-інноваційну стійкість. Обґрунтовано використання нечіткого логічного висновку Mamdani для інтеграції кількісних і якісних параметрів, що мають різну природу, шкали вимірювання та рівень визначеності. Розкрито можливості сценарного моделювання індексу IDEM із застосуванням Latin Hypercube Sampling, що дозволяє досліджувати поведінку моделі у просторі багатофакторної невизначеності та формувати репрезентативні набори управлінських сценаріїв. Запропоновано нейромережевий модуль прогнозування IDEM на основі багатошарового перцептрона, який виконує функцію швидкого апроксиматора

нечітко-логічної системи та може бути інтегрований у цифрові системи підтримки прийняття рішень будівельних підприємств.

Ключові слова: *економіко-цифрове управління, будівельне підприємство, нечітка логіка, IDEM, цифрова зрілість, біосферосумісне будівництво, Latin Hypercube Sampling, штучна нейронна мережа, стейкхолдери.*

Вступ. Будівельні підприємства дедалі частіше працюють у середовищі, де економічна результативність залежить не лише від обсягів виконаних робіт, собівартості та прибутковості, а й від якості цифрового управління, здатності працювати з даними, екологічної відповідальності, узгодженості зі стейкхолдерами та організаційної готовності до змін. Для українського будівельного сектору ця проблема має особливу вагу через одночасний вплив відновлювальних потреб, інвестиційної невизначеності, технологічного оновлення, ресурсних обмежень і підвищених вимог до прозорості управління проектами.

Традиційні підходи до оцінювання ефективності діяльності будівельних підприємств переважно будуються навколо фінансово-економічних індикаторів. Такий підхід залишається необхідним, але вже не є достатнім для пояснення реальної управлінської спроможності підприємства. Підприємство може мати прийнятні фінансові результати, але демонструвати низьку готовність до цифрової інтеграції, слабку систему роботи з даними, недостатню екологічну керованість або обмежену адаптивність управлінської структури. У таких випадках формально позитивна економічна оцінка не гарантує довгострокової конкурентоспроможності.

Ускладнення управлінського середовища зумовлює потребу в моделях, які здатні працювати з різномірними даними: кількісними показниками фінансового стану, експертними оцінками цифрової зрілості, якісними характеристиками стейкхолдерної взаємодії, екологічними параметрами та індикаторами організаційної стійкості. Значна частина таких характеристик має нечітку природу: межі між «низьким», «середнім» і «високим» рівнями розвитку не завжди можуть бути задані жорсткими нормативними значеннями. Тому особливої актуальності набуває використання інтелектуальних методів моделювання, зокрема нечіткої логіки, сценарного моделювання та штучних нейронних мереж.

Метою статті є обґрунтування архітектури інтелектуальної моделі оцінювання ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами та визначення можливостей поєднання нечітко-логічного, сценарного й нейромережевого підходів у межах інтегрального індексу IDEM.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Методологічною основою дослідження є праці, присвячені нечіткій логіці, багатокритеріальному оцінюванню, цифровізації будівництва, управлінню стейкхолдерами та інтелектуальним моделям підтримки прийняття рішень. Засадничі положення нечіткої логіки, сформульовані Л. Заде, довели можливість математичного опису ситуацій, у яких управлінські висновки не зводяться до бінарних оцінок і потребують роботи з лінгвістичними категоріями [1]. Подальший розвиток fuzzy-підходу у працях Т. Росса поглибив його прикладне значення для інженерних та управлінських систем, у яких поєднуються числові дані та експертні судження [2].

У будівельній сфері нечітко-логічні моделі застосовуються для оцінювання планованих проєктів, ризиків, ресурсних рішень, екологічних параметрів та якості управління. Зокрема, М. Gajzler і К. Zima показали придатність fuzzy-підходу для попередньої оцінки будівельних проєктів [3], а дослідження А. Rahim та співавторів засвідчило ефективність fuzzy-TOPSIS у задачах вибору матеріалів з урахуванням ризиків безпеки, здоров'я та навколишнього середовища [4]. В екологічному менеджменті нечітка логіка використовується для формалізації слабоструктурованих параметрів, що підтверджує її релевантність для оцінювання біосферосумісності будівельної діяльності [5].

Для українського наукового дискурсу важливими є роботи Г. Рижакової та співавторів, у яких розкрито методологічні аспекти економіко-управлінського забезпечення інноваційної платформи будівельного девелопменту, а також застосування нечіткої логіки для оцінювання ризиків системи управління будівельного підприємства [6; 7]. Ці напрацювання формують підґрунтя для переходу від окремих індикаторів оцінювання до комплексних моделей, здатних описувати взаємозалежність економічних, управлінських, цифрових і ризикових характеристик підприємства.

Праці В. Гончар і О. Калініна посилюють проєктно-екосистемний вимір дослідження. У контексті мультипроєктного державно-приватного партнерства у будівництві ними акцентовано роль узгодження багатьох учасників, процедур та управлінських контурів [8]. У дослідженні екосистемного управління конфліктами в проєктному менеджменті девелоперських компаній обґрунтовано, що складність будівельних і девелоперських проєктів потребує формалізації взаємодій, раннього виявлення проблем і цифрової підтримки управлінських рішень [9]. Для пропонованої моделі IDEM це має методичне значення, оскільки ефективність економіко-цифрового управління залежить не лише від внутрішніх процесів підприємства, а й від якості взаємодії у стейкхолдерній екосистемі.

Окремий блок досліджень стосується цифрових екосистем у будівельному девелопменті. Ю. Кричевська, Г. Рижакова та співавтори розглядають цифрову екосистему як середовище трансформації управлінських імперативів будівельного девелопменту [10]. Х. Чуприна та співавтори підкреслюють, що цифрова трансформація операційних систем підприємств-стейкхолдерів змінює економіко-управлінські умови розвитку будівельного девелопменту [11]. У сукупності ці праці підтверджують потребу в інтегрованому індексі, який одночасно враховує економічні, цифрові, екологічні, стейкхолдерні та організаційно-інноваційні складові.

Методи сценарного моделювання, зокрема Latin Hypercube Sampling, розглядаються як інструмент репрезентативного охоплення багатовимірному простору параметрів [12–14]. У поєднанні з нечіткою логікою вони дозволяють досліджувати не один фіксований стан системи, а множину можливих управлінських ситуацій. Дослідження щодо інтеграції LHS та нейронних мереж підтверджують перспективність такого підходу для побудови сурогатних моделей і швидкого прогнозування результатів складних систем [15]. У сфері будівництва та експлуатації інфраструктури штучні нейронні мережі застосовуються для прогнозування стану об'єктів, планування технічного обслуговування, оцінювання ризиків і підтримки прийняття рішень [16–18].

Постановка завдання. Незважаючи на наявність значного наукового доробку щодо нечіткої логіки, цифровізації будівництва, стейкхолдерного управління та машинного навчання, залишається недостатньо формалізованою прикладна модель, яка б поєднувала ці напрями у єдиному інструменті оцінювання ефективності економіко-цифрового управління будівельним підприємством. Потребує уточнення структура інтегрального індексу, логіка добору функціональних компонентів, порядок переходу від нечітко-логічного оцінювання до сценарного аналізу та можливість використання нейронної мережі як прогнозного модуля.

Для досягнення мети статті поставлено такі завдання: сформувати зміст інтегрального індексу IDEM як узагальненої оцінки ефективності економіко-цифрового управління; визначити функціональні компоненти нижнього і верхнього рівнів моделі; обґрунтувати доцільність використання нечіткого логічного висновку Mamdani; описати можливості сценарного моделювання з використанням Latin Hypercube Sampling; запропонувати архітектуру штучної нейронної мережі для прогнозування значення IDEM; окреслити напрями практичного використання моделі у системах управління будівельних підприємств.

Результати. Запропонована модель виходить із того, що ефективність економіко-цифрового управління будівельним підприємством є інтегральною

категорією. Вона охоплює не лише фінансову спроможність підприємства, а й цифрову інтегрованість процесів, екологічну відповідальність, якість стейкхолдерної взаємодії, людиноцентричність управління та організаційну здатність до інновацій. Для формалізації цієї категорії використано інтегральний індекс IDEM (Integrated Digital-Economic Management Index), який подається як фінальний вихід багаторівневої нечітко-логічної системи.

Модель має дворівневу архітектуру. Нижній рівень складається з п'яти нечітко-логічних підсистем, кожна з яких оцінює окремий функціональний напрям діяльності підприємства. На верхньому рівні результати цих підсистем агрегуються у фінальний індекс IDEM. Така побудова дозволяє уникнути надмірного спрощення: підприємство оцінюється не за одним набором фінансових коефіцієнтів, а як складна економіко-цифрова система, у якій різні блоки розвитку можуть взаємно посилювати або обмежувати один одного.

Таблиця 1

Компоненти інтегрального індексу IDEM та їх змістове наповнення

Компонент	Зміст оцінювання	Базові вхідні індикатори	Управлінська інтерпретація
Out1	Економічна результативність підприємства	рентабельність операційної діяльності; фінансова стійкість; ресурсно-економічна ефективність; інвестиційно-економічна привабливість	характеризує фінансову основу цифровізації, екологічної модернізації та інноваційного розвитку
Out2	Цифрова зрілість управління	цифрова інтеграція процесів; автоматизація управління; зрілість систем даних; цифрова компетентність персоналу	відображає здатність підприємства працювати в цифровому середовищі та координувати дані між учасниками проєкту
Out3	Екологічна та біосферосумісна ефективність	енергоефективність; інтенсивність екологічного впливу; ефективність використання ресурсів і матеріалів; ESG-екологічна відповідність	показує спроможність підприємства поєднувати економічну діяльність із принципами сталості та біосферосумісності
Out4	Стейкхолдерно-людиноцентрична орієнтованість	безпека і якість трудового середовища; задоволеність стейкхолдерів; корпоративна соціальна відповідальність; ефективність комунікацій	характеризує соціально-комунікаційний контур управління та рівень довіри між учасниками будівельного процесу
Out5	Організаційно-інноваційна стійкість	адаптивність управління; інноваційна активність; ризикостійкість; стратегічна організаційна гнучкість	відображає здатність підприємства зберігати керованість, упроваджувати інновації та реагувати на турбулентність

Джерело: сформовано автором на основі [5-8, 11-16].

Перший компонент, економічна результативність, виконує в моделі базову роль. Саме фінансова стійкість, операційна прибутковість, ресурсна ефективність та інвестиційна привабливість визначають, чи має підприємство реальну спроможність фінансувати цифрові технології, підтримувати екологічні програми, розвивати персонал і впроваджувати інновації. У межах нечіткої логічного підходу цей компонент не зводиться до одного коефіцієнта: він поєднує кілька параметрів, кожен із яких може бути оцінений через лінгвістичні терми «низький», «середній» і «високий».

Другий компонент, цифрова зрілість управління, описує рівень готовності підприємства до роботи з цифровими платформами, ВІМ-інструментами, системами автоматизації, даними та цифровими компетентностями персоналу. У будівельній галузі ця складова має особливе значення через складну структуру проєктів, значну кількість учасників і потребу в постійному оновленні даних. Цифрова зрілість у моделі IDEM трактується не як факт використання окремого програмного продукту, а як здатність підприємства створювати цілісне цифрове середовище управління.

Третій компонент відображає екологічну та біосферосумісну ефективність. Його включення до моделі обумовлене тим, що будівництво є ресурсомісткою сферою і має значний вплив на довкілля. У цифровій економіці екологічні рішення дедалі частіше підтримуються цифровими інструментами: моніторингом енергоспоживання, аналізом життєвого циклу, цифровими двійниками, системами контролю відходів та аналітикою екологічних ризиків. Тому екологічна ефективність у моделі IDEM пов'язується не лише з дотриманням нормативних вимог, а й із цифровою керованістю екологічних параметрів.

Четвертий компонент фіксує стейкхолдерно-людиноцентричну орієнтованість. Будівельне підприємство функціонує в мережі інвесторів, замовників, підрядників, проєктувальників, постачальників, громад, органів влади та персоналу. Якість взаємодії між цими групами безпосередньо впливає на строки, вартість, репутацію й сталість проєктів. Людиноцентричний вимір важливий і для цифрової трансформації, адже ефективність цифрових інструментів залежить від підготовленості персоналу, довіри до даних, культури комунікації та готовності організації до змін.

П'ятий компонент характеризує організаційно-інноваційну стійкість. Він відображає здатність підприємства адаптувати управлінську систему, підтримувати інновації, працювати з ризиками та змінювати стратегічні пріоритети відповідно до нових умов. Для будівельного підприємства ця складова є критичною, оскільки навіть високий рівень цифрової технологічності

не забезпечує результату без організаційної здатності впроваджувати зміни, перебудовувати процеси та підтримувати стабільність реалізації проєктів.

Нечітко-логічний механізм моделі передбачає послідовне виконання п'яти процедур: нормалізації вхідних показників, фазифікації, застосування бази правил, агрегації результатів і дефазифікації. На етапі нормалізації різнорідні параметри приводяться до єдиного діапазону $[0; 1]$. Для показників прямої дії використовується логіка, за якою більше значення відповідає вищому рівню ефективності, а для показників оберненої дії застосовується інверсна шкала. Це дозволяє об'єднувати економічні, цифрові, екологічні та соціальні індикатори в одній системі оцінювання.

Фазифікація перетворює чітке числове значення показника на ступені належності до нечітких множин. Для кожної змінної доцільно використовувати три базові лінгвістичні терми: низький, середній і високий рівень. Така градація є достатньо простою для практичного застосування, але водночас дозволяє уникнути жорсткого поділу підприємств на дискретні класи. Наприклад, значення цифрової зрілості 0,62 може частково належати до множини «середній рівень» і водночас частково до множини «високий рівень», що краще відображає реальну невизначеність управлінської оцінки.

База нечітких правил формалізує експертну логіку оцінювання. На нижньому рівні правила описують взаємозв'язок між первинними індикаторами та відповідним агрегованим показником Out1–Out5. На верхньому рівні правила визначають, як поєднання п'яти агрегованих компонентів формує інтегральний індекс IDEM. Найбільш сприятливий сценарій має вигляд: якщо економічна результативність, цифрова зрілість, екологічна ефективність, стейкхолдерна орієнтованість і організаційна стійкість є високими, то IDEM набуває високого значення. Водночас правила мають враховувати й критичні обмеження: низька економічна результативність або поєднання слабкої цифрової зрілості з низькою організаційною стійкістю істотно знижують інтегральну ефективність.

Для нечіткого виведення доцільно застосовувати алгоритм Mamdani, оскільки він добре узгоджується з експертною логікою управлінського оцінювання і забезпечує високу інтерпретованість результатів. Після активації правил результати агрегуються в єдину нечітку множину вихідної змінної. На завершальному етапі виконується дефазифікація, тобто перетворення нечіткого висновку на чітке числове значення. У результаті формується індекс IDEM у межах $[0; 1]$, де низькі значення свідчать про фрагментарність або дисбаланс економіко-цифрового управління, середні - про частково сформовану систему, а високі - про збалансовану, цифрово інтегровану та стійку модель управління. Запропоновану концептуальну структуру інтелектуальної моделі IDEM, що поєднує п'ять ключових компонентів економіко-цифрового управління, нечітко-

логічний механізм оцінювання та послідовність побудови прогнозного інструментарію, наведено на рис. 1.

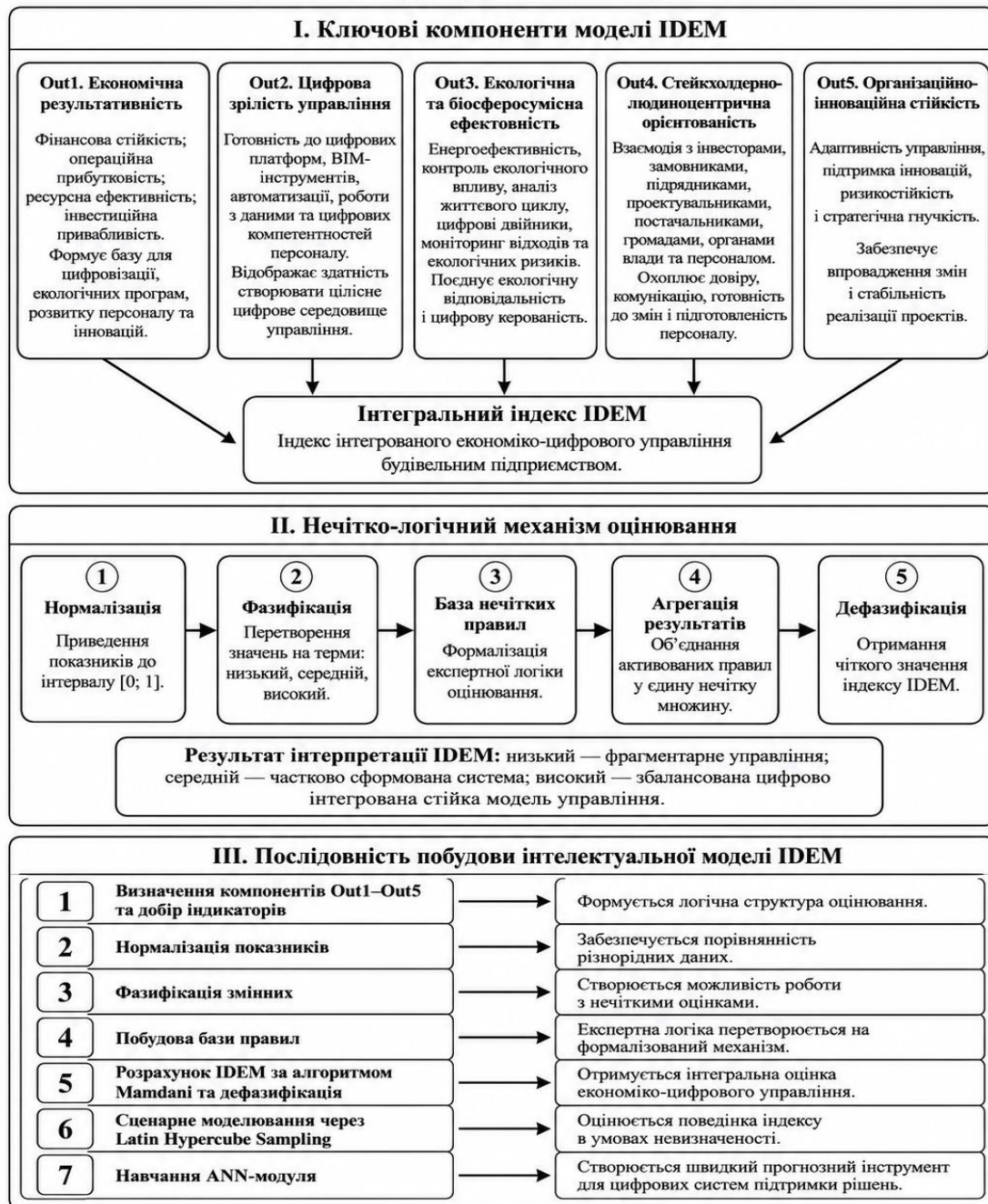


Рис. 1. Концептуальна структура інтелектуальної моделі IDEM

Джерело: сформовано автором.

Після побудови нечітко-логічної системи виникає потреба перевірити її поведінку не в одному детермінованому стані, а в широкому просторі можливих управлінських ситуацій. Для цього доцільно застосовувати Latin Hypercube Sampling. На відміну від звичайної випадкової генерації сценаріїв, цей метод забезпечує стратифіковане покриття діапазону кожної змінної. Кожен інтервал імовірності використовується в межах вибірки, що знижує ризик випадкового накопичення сценаріїв лише в окремих частинах простору параметрів.

У моделі IDEM сценарний простір може формуватися на основі агрегованих показників Out1–Out5. Такий підхід зменшує розмірність задачі, оскільки кожен із цих показників уже містить узагальнену інформацію відповідної нижньорівневої підсистеми. У проведеному методичному прикладі доцільним є формування датасету з 3334 сценаріїв, що дозволяє охопити різні комбінації економічної результативності, цифрової зрілості, екологічної ефективності, стейкхолдерної орієнтованості й організаційної стійкості.

Кожен сценарій подається на вхід верхнього рівня нечітко-логічної моделі, після чого розраховується відповідне значення IDEM. У результаті інтегральний індекс розглядається не як одна фіксована величина, а як розподіл можливих значень. Це відкриває можливість аналізувати середнє значення, медіану, стандартне відхилення, мінімум, максимум, перцентилі, коефіцієнт варіації, асиметрію, ексцес і довірчий інтервал. Для управлінської практики така логіка є важливою, оскільки вона показує не лише очікуваний рівень ефективності, а й ступінь ризику, стабільності та чутливості системи.

Сценарне моделювання дає змогу виділити типові управлінські профілі будівельних підприємств. Перший профіль - збалансовано сильний: усі п'ять компонентів мають високі або близькі до високих значення, а IDEM перебуває у верхній зоні шкали. Другий профіль - цифрово активний, але економічно обмежений: підприємство має цифрові інструменти, але недостатня фінансова стійкість обмежує масштабування управлінських змін. Третій профіль - економічно стабільний, але організаційно інертний: фінансові показники є прийнятними, проте слабка адаптивність знижує здатність підприємства використовувати цифрові й екологічні можливості. Четвертий профіль - соціально орієнтований, але технологічно відсталий: підприємство має якісну комунікацію зі стейкхолдерами, але недостатній рівень цифровізації обмежує керованість проєктів.

Аналіз чутливості IDEM дозволяє визначити, які компоненти найсильніше впливають на інтегральний результат. З цією метою може використовуватися кореляційний аналіз між Out1–Out5 та фінальним індексом. Якщо певний компонент демонструє найвищий зв'язок з IDEM, він може розглядатися як

стратегічна точка управлінського впливу. Водночас надмірна залежність індексу лише від одного компонента свідчатиме про структурний дисбаланс моделі управління. Збалансована система має демонструвати відчутний, але не монопольний вплив кожної складової.

Наступним кроком розвитку моделі є нейромережеве прогнозування. Штучна нейронна мережа не замінює нечітко-логічну модель, а виконує функцію її швидкого апроксиматора. Якщо нечітка система містить функції належності, правила, процедури агрегації й дефазифікації, то навчена ANN може відтворювати залежність між Out1–Out5 та IDEM значно швидше, що особливо важливо для цифрових платформ управління, де необхідно оперативно оцінювати багато альтернативних сценаріїв.

Для прогнозування IDEM доцільно використовувати багатошаровий перцептрон із п'ятьма вхідними нейронами, трьома прихованими шарами та одним вихідним нейроном. Вхідними параметрами є Out1, Out2, Out3, Out4 та Out5. Вихідним параметром є прогнозоване значення IDEM. Архітектура 5-64-32-16-1 є достатньою для апроксимації нелінійної залежності, сформованої нечіткою системою Mamdani, і водночас не створює надмірної складності для датасету середнього розміру (табл. 2).

Таблиця 2

Рекомендована архітектура ANN-модуля прогнозування IDEM

Параметр моделі	Рекомендоване рішення
Тип нейронної мережі	Multilayer Perceptron
Кількість входів	5 агрегованих показників: Out1–Out5
Вихідна змінна	IDEM
Приховані шари	64 нейрони; 32 нейрони; 16 нейронів
Функції активації	ReLU у прихованих шарах; sigmoid у вихідному шарі
Функція втрат	Mean Squared Error
Додаткові метрики	MAE, RMSE, R ²
Оптимізатор	Adam
Розмір пакета даних	32
Кількість епох	100–300 з контролем перенавчання

Джерело: сформовано автором.

Використання сигмоїдної функції на виході є методично виправданим, оскільки IDEM нормалізований у межах [0; 1]. Це запобігає формуванню прогнозних значень поза межами шкали оцінювання. Приховані шари з ReLU-активацією забезпечують здатність моделі відтворювати нелінійні залежності, які виникають у fuzzy-системі через взаємодію правил, різні ступені належності та процедуру дефазифікації.

Формування навчального датасету на основі результатів нечітко-логічного моделювання має кілька переваг. По-перше, такий датасет є структурованим і репрезентативним, оскільки його сценарії створюються за допомогою LHS. По-друге, він не залежить від наявності повного масиву конфіденційних корпоративних даних, що часто є проблемою для будівельних підприємств. По-третє, fuzzy-модель передає ANN експертну логіку оцінювання, а нейронна мережа після навчання забезпечує швидке прогнозування для нових комбінацій параметрів.

У практичній площині модель IDEM може використовуватися як інструмент діагностики економіко-цифрового управління. Підприємство може оцінити поточний стан за кожним із п'яти компонентів і визначити, які саме блоки стримують інтегральну ефективність. Наприклад, низький Out2 за прийнятного Out1 вказуватиме на потребу в цифровій інтеграції процесів, а слабкий Out5 – на необхідність посилення адаптивності управління та інноваційної активності. Якщо ж найслабшим є Out4, першочергової уваги потребуватимуть безпека праці, комунікації, CSR-політика та робота зі стейкхолдерами.

Модель може бути застосована і для сценарного планування. Керівництво підприємства може порівнювати альтернативні програми розвитку: інвестиції в BIM і цифрові платформи, модернізацію екологічного моніторингу, програми підвищення цифрових компетентностей персоналу, зміну системи ризик-менеджменту або впровадження ESG-звітності. Для кожної альтернативи можна змоделювати очікуване значення IDEM і визначити, який напрям дає найбільший приріст інтегральної ефективності.

Ще одним прикладним напрямом є порівняльний аналіз підприємств або проектних портфелів. Оскільки всі компоненти нормалізуються до єдиної шкали, модель дозволяє зіставляти різні підприємства за єдиною логікою оцінювання. Водночас важливо, щоб ваги, функції належності та база правил проходили експертне погодження з урахуванням масштабу підприємства, типу будівельної діяльності, доступності даних і рівня цифрової зрілості.

Запропонований підхід має не лише діагностичну, а й управлінську функцію. IDEM може бути включений до системи KPI цифрової трансформації, ESG-орієнтованого розвитку або інноваційної стратегії будівельного підприємства. У такому разі модель перетворюється з аналітичного інструменту на елемент регулярного управлінського моніторингу, який дозволяє відстежувати не лише фінансові результати, а й якість переходу підприємства до економіко-цифрової моделі розвитку.

Водночас модель має низку обмежень. По-перше, якість результатів залежить від коректності добору вхідних показників і вагових коефіцієнтів. По-друге, база нечітких правил потребує експертної валідації. По-третє, синтетичний датасет для ANN має бути доповнений реальними даними підприємств у міру їх накопичення. По-четверте, модель не повинна використовуватися як механічний заміник управлінського рішення: її призначення полягає в підвищенні обґрунтованості оцінювання, а не в автоматичному ухваленні рішень без контекстного аналізу.

Висновки. У статті обґрунтовано інтелектуальний підхід до оцінювання ефективності економіко-цифрового управління будівельними підприємствами на основі інтегрального індексу IDEM. Доведено, що сучасна ефективність будівельного підприємства має багатовимірний характер і повинна оцінюватися через взаємодію економічних, цифрових, екологічних, стейкхолдерних та організаційно-інноваційних компонентів.

Запропонована дворівнева нечітко-логічна архітектура дозволяє поєднати локальні функціональні підсистеми Out1–Out5 у межах єдиного інтегрального показника. Використання нечіткого логічного висновку Mamdani забезпечує можливість інтегрувати кількісні індикатори та якісні експертні оцінки, що особливо важливо для слабоструктурованих управлінських параметрів цифрової зрілості, стейкхолдерної взаємодії, екологічної відповідальності й організаційної адаптивності.

Обґрунтовано доцільність застосування Latin Hypercube Sampling для сценарного моделювання IDEM. Такий підхід дає можливість досліджувати поведінку інтегрального індексу в умовах багатофакторної невизначеності, формувати репрезентативні сценарії та оцінювати стійкість системи управління за допомогою статистичних характеристик і аналізу чутливості.

Запропоновано нейромережевий модуль прогнозування IDEM на основі багатосарового перцептрона з архітектурою 5-64-32-16-1. Визначено, що ANN доцільно використовувати як швидкий апроксиматор fuzzy-моделі, який після навчання може оперативно прогнозувати інтегральну ефективність для нових комбінацій агрегованих показників. Це створює передумови для інтеграції моделі у цифрові системи підтримки прийняття рішень будівельних підприємств.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на емпіричну перевірку моделі на даних реальних будівельних підприємств, уточнення функцій належності для різних типів підприємств, валідацію бази правил експертними групами та інтеграцію IDEM із цифровими панелями моніторингу управлінської ефективності.

Список використаних джерел:

1. Zadeh L. A. Is there a need for fuzzy logic? *Information Sciences*. 2008. Vol. 178, No. 13. P. 2751–2779.
2. Ross T. J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. 3rd ed. Chichester: Wiley, 2010.
3. Gajzler M., Zima K. Evaluation of Planned Construction Projects Using Fuzzy Logic. *International Journal of Civil Engineering*. 2017. Vol. 15, No. 4. P. 641–652.
4. Rahim A. A., Musa S. N., Ramesh S., Lim M. K. Development of a fuzzy-TOPSIS multi-criteria decision-making model for material selection with the integration of safety, health and environment risk assessment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2021.
5. McKone T. E., Deshpande A. W. Can Fuzzy Logic Bring Complex Environmental Problems into Focus? *Environmental Science & Technology*. 2005. Vol. 39, No. 2. P. 42A–47A.
6. Ryzhakova H., Homenko O. Methodological regulation of the economic and management ensuring the innovative platform of building development. 2022.
7. Ryzhakova G., Honcharenko T., Predun K., Petrukha N., Malykhina O., Khomenko O. Using of Fuzzy Logic for Risk Assessment of Construction Enterprise Management System. Astana, Kazakhstan: IEEE, 2023. ISBN 979-8-3503-3504-0.
8. Gonchar V. V., Kalinin O. V. Construction Project Management in the Format of Multi-Project Public-Private Partnership. *Management of Economy: Theory and Practice. Chumachenko's Annals: collection of scientific papers / Institute of Industrial Economics of the NAS of Ukraine*. Kyiv, 2024. P. 97–110. DOI: <https://doi.org/10.37405/2221-1187.2024.97-110>.
9. Гончар В. В., Калінін О. В. Екосистемне управління конфліктами в проєктному менеджменті девелоперських компаній. 2025. DOI: [https://doi.org/10.58253/2078-1628-2025-2\(34\)-020](https://doi.org/10.58253/2078-1628-2025-2(34)-020).
10. Кричевська Ю. В., Рижакова Г. М., Шпаков А. В., Поколенко В. О., Приходько Д. О. Цифрова екосистема в будівельному девелопменті: концептуально-теоретичні аспекти трансформації та управлінські імперативи. *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 60. С. 174–182.
11. Чуприна Х. М., Перелі Д. С., Кушнір О. О., Черненко М. О., Ван Ю. Економіко-управлінські імперативи розвитку будівельного девелопменту в умовах цифрової трансформації операційних систем підприємств-стейкхолдерів. *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 60. С. 209–220. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.209-220>

12. Shields M. D., Zhang J. The generalization of Latin hypercube sampling. *Reliability Engineering & System Safety*. 2016. Vol. 148. P. 96–108.
13. Stein M. Large sample properties of simulations using Latin hypercube sampling. *Technometrics*. 1987. Vol. 29, No. 2. P. 143–151.
14. Helton J. C., Davis F. J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2002. Vol. 81. P. 23–69.
15. Borisut P., Nuchitprasittichai A. Adaptive Latin Hypercube Sampling for a Surrogate-Based Optimization with Artificial Neural Network. *Processes*. 2023.
16. Cheng J. C., Chen W., Chen K., Wang Q. Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 112. Article 103087.
17. Tian K., Zhu Z., Mbachu J., Ghanbaripour A., Moorhead M. Artificial intelligence in risk management within the realm of construction projects: A bibliometric analysis and systematic literature review. *Journal of Innovation & Knowledge*. 2025. Vol. 10, No. 3. Article 100711.
18. Farrar C. R., Worden K. *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. Wiley, 2012.

Oleh ONOFRIICHUK

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor,
Dean of the Faculty of Economics,
Department of Economics and Finance,
Academician Stepan Demianchuk
International University of Economics and Humanities,
Rivne, Ukraine

 <http://orcid.org/0000-0002-8765-6656>
onofriichuk.oleh@megu.edu.ua

INTELLIGENT MODELLING OF THE EFFICIENCY OF ECONOMIC AND DIGITAL MANAGEMENT OF CONSTRUCTION ENTERPRISES

Abstract. *The article substantiates a methodological approach to intelligent modelling of the efficiency of economic and digital management of construction enterprises. It is argued that the performance of such management cannot be assessed only through financial indicators, since digitalisation of construction, ESG*

requirements, BIM-oriented management, environmental responsibility, stakeholder interaction and organisational adaptability form an integrated system of interdependent managerial parameters. A two-level fuzzy logic model is proposed, with the Integrated Digital-Economic Management Index (IDEM) as its final output. The lower level of the model includes five functional subsystems: economic performance, digital management maturity, environmental and biosphere-compatible efficiency, stakeholder and human-centred orientation, and organisational and innovation resilience. The use of Mamdani fuzzy inference is justified as a tool for integrating quantitative and qualitative parameters with different scales and degrees of uncertainty. The article also describes the use of Latin Hypercube Sampling for scenario modelling of IDEM under multifactor uncertainty and proposes an artificial neural network module based on a multilayer perceptron for rapid forecasting of the index. The proposed hybrid approach combines the interpretability of fuzzy logic, the representativeness of scenario modelling and the predictive capacity of neural networks, which makes it suitable for digital decision-support systems in construction enterprises.

Keywords: economic and digital management, construction enterprise, fuzzy logic, IDEM, digital maturity, biosphere-compatible construction, Latin Hypercube Sampling, artificial neural network, stakeholders.

Надійшла до редакції: 01.05.2026

Пройшла рецензування: 15.05.2026

Прийнята до друку: 22.05.2026

Опублікована: 29.05.2026