

Голові разової спеціалізованої вченої ради

PhD56.126

Київського національного університету
будівництва і архітектури доктору технічних наук,
професору Бородавці Євгену Володимировичу

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора, професора кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка» Олійника Андрія Олександровича на дисертаційну роботу Федорченка Миколи Андрійовича **«Інтелектуальна інформаційна система підтримки вибору альтернатив енергоощадних будівель з використанням штучного інтелекту»**, подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології» галузі знань 12 «Інформаційні технології».

Актуальність дослідження. Актуальність дисертаційного дослідження обумовлена необхідністю формування та впровадження нових інтелектуальних інформаційних рішень, орієнтованих на підвищення енергоефективності будівель в умовах посилення кліматичних змін, нестабільності енергетичних систем та зростання вимог до принципів сталого розвитку. Існуючі підходи до проектування будівельних об'єктів сьогодні не забезпечують належного рівня точності в прогнозуванні енергетичних характеристик, що зумовлено складністю багатфакторного впливу конструктивних, просторових і кліматичних параметрів. У цьому контексті інтеграція методів штучного інтелекту з BIM-технологіями постає як один із найбільш перспективних напрямів цифрової трансформації будівельної галузі. Реалізація такого підходу створює передумови для формування цифрових двійників будівель, що дозволяє перейти до автоматизованого та багатокритеріального аналізу проектних рішень. Особливого значення набуває розвиток інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, здатних до адаптації в умовах змінності вихідних даних та невизначеності середовища. Окремо слід відзначити високу практичну актуальність проблеми для України, де процеси відновлення та модернізації будівельного фонду потребують впровадження сучасних цифрових технологій нового покоління. Створення інтелектуальної інформаційної системи сприяє підвищенню ефективності вибору енергоощадних рішень та забезпечує більш обґрунтований характер проектування. Таким чином, дослідження має комплексну наукову та прикладну значущість, оскільки

спрямоване на розроблення інноваційних цифрових інструментів для забезпечення енергоефективності та сталого розвитку будівельної галузі.

Відповідність дисертаційної роботи вимогам Стандарту вищої освіти зі спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, затвердженого наказом МОН України від 08.08.2023 №955, підтверджується узгодженістю отриманих результатів із програмними компетентностями щодо розроблення та дослідження інформаційних систем, застосування сучасних методів штучного інтелекту та моделювання складних систем. Зміст дисертації свідчить про належний рівень наукової новизни, практичної спрямованості та повну відповідність кваліфікаційним вимогам зазначеного освітньо-наукового рівня вищої освіти та наукового ступеня «доктор філософії».

Наукова новизна отриманих автором результатів. *Наукова новизна дисертаційної роботи в цілому, на думку опонента, полягає у формуванні комплексного цифрового аналітичного середовища та прикладного інструментарію для підтримки вибору альтернатив енергоощадних будівель із використанням методів штучного інтелекту та BIM-технологій. Запропонована концепція забезпечує інтеграцію процесів моделювання, аналізу та прийняття рішень у межах єдиного інформаційного простору, орієнтованого на оцінювання енергоефективності та виявлення енергетичних ризиків протягом усього життєвого циклу об'єкта. Реалізовано підхід до поєднання інтелектуальних аналітичних систем із цифровими моделями будівель, що дозволяє підвищити обґрунтованість проектних рішень. Отримані результати формують нову основу для розвитку когнітивно-орієнтованих систем підтримки проектування. Загалом це забезпечує підвищення ефективності цифрової трансформації будівельної галузі.*

У даній роботі вперше розроблено та обґрунтовано:

- інтелектуальну інформаційну систему підтримки вибору енергоефективних рішень, у якій BIM-середовище виконує функцію інтеграційного ядра цифрової взаємодії, забезпечуючи акумуляцію, структурування та обмін даними між учасниками проектного процесу, тоді як модуль штучного інтелекту реалізує аналітичну функцію прийняття рішень. Система побудована на принципах мікросервісної архітектури з API-орієнтованою взаємодією компонентів, що забезпечує її масштабованість, гнучкість та інтероперабельність у межах життєвого циклу будівельного об'єкта;

- адаптивний метод багатокритеріального вибору архітектурно-інженерних рішень, що базується на поєднанні нечіткої логіки, нейронних мереж та методів опорних векторів, забезпечуючи ефективну роботу в умовах

багатофакторної невизначеності. Удосконалено когнітивну модель проєктування, яка інтегрує IoT-дані, теплотехнічне моделювання та алгоритми машинного навчання, що дозволяє здійснювати прогнозування параметрів енергоефективності та формувати узгоджені техніко-економічні рішення.

Вважаю, що у дисертації удосконалено інструментарій візуалізації енергетичних моделей та структуру цифрового аналітичного простору, що забезпечує більш аргументоване та структуроване прийняття проєктних рішень у процесі енергоефективного проєктування. Розроблений аналітичний простір реалізовано як інтегроване цифрове середовище, яке об'єднує BIM-моделі, алгоритми штучного інтелекту, засоби енергомоніторингу та модулі підтримки прийняття рішень у єдиному інтелектуальному контурі. Це дозволяє здійснювати комплексний аналіз енергетичних характеристик будівель у режимі багаторівневої взаємодії даних. Підвищено ефективність інтерпретації результатів моделювання та їх використання у проєктній практиці. У цілому удосконалення спрямоване на підвищення якості аналітичного супроводу проєктних рішень.

Завдяки одержаним у роботі результатам, *набули подальшого розвитку* концептуальні засади формалізованого простору проєктування, що враховує показники енергоефективності, внутрішні термодинамічні процеси та зовнішні кліматичні впливи. Це забезпечує більш комплексну оцінку проєктних альтернатив і підвищує точність багатокритеріальної оптимізації рішень у сфері енергоощадного будівництва. Розширено підхід до врахування сценаріїв багатофакторних ризиків із можливістю адаптивного коригування параметрів на основі прогнозних моделей машинного навчання. Додатково удосконалено механізми автоматизованого виявлення енергетичних загроз і критичних відхилень, що базуються на аналізі потокових IoT-даних. У результаті підвищено ефективність ранньої діагностики та прогнозування енергетичних ризиків.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі, є достатньо високою та забезпечується коректним застосуванням сучасних методів наукового дослідження, зокрема системного аналізу, моделювання складних систем і формалізації процедур прийняття рішень. Отримані наукові результати пройшли належну апробацію, були представлені на міжнародних науково-практичних конференціях і підтверджені відповідними довідками про впровадження та результати апробації. Проведені автором експериментальні дослідження засвідчили ефективність запропонованого гібридного підходу, який демонструє вищу продуктивність порівняно з

традиційними стратегіями управління кешуванням. Зокрема, встановлено зменшення кількості звернень до бази даних за рахунок підвищення частоти успішних звернень до кешу. Отримані результати підтверджують практичну доцільність та ефективність запропонованого наукового рішення.

Теоретичне та практичне значення одержаних результатів.

Теоретичне значення одержаних результатів дисертаційного дослідження за темою «Інтелектуальна інформаційна система підтримки вибору альтернатив енергоощадних будівель з використанням штучного інтелекту» полягає у поглибленні науково-методологічних засад спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» через формування цілісної концепції інтелектуалізації процесів проектування енергоефективних будівель. У роботі здійснено системну інтеграцію методів штучного інтелекту, глибинного навчання, нечіткої логіки та еволюційних алгоритмів у BIM-середовище, що забезпечує формування нової парадигми когнітивно-орієнтованого та адаптивного проектування. Теоретично обґрунтовано принципи побудови мікросервісної архітектури інтелектуальних систем та формалізованого управління параметрами енергоефективності будівель. Запропонована модель багатокритеріального інтелектуального вибору проектних рішень розширює наукові уявлення про функціонування сучасних інформаційних систем підтримки прийняття рішень. Отримані результати формують методологічне підґрунтя для розвитку систем самонавчання, прогнозової аналітики та цифрового моделювання у будівництві.

Практичне значення результатів дисертації полягає у створенні та експериментальній апробації інтелектуальної інформаційної системи підтримки вибору енергоощадних будівельних рішень, яка може бути впроваджена у процеси проектування та управління енергоефективністю будівель у цифровому BIM-середовищі. Запропонована мікросервісна архітектура забезпечує високу масштабованість, модульність і інтеграцію з реальними даними енергоаудиту та експлуатації об'єктів. Розроблені алгоритми багатокритеріального аналізу, прогнозування тепловтрат і оптимізації рішень дозволяють підвищити точність оцінювання енергетичних характеристик та скоротити тривалість проектного циклу. Практична реалізація результатів підтверджена створенням MVP-прототипу, адаптованого до чинних українських нормативів і кліматичних умов. Отримані результати впроваджено в освітній процес КНУБА в межах дисциплін спеціальностей 122 та 126, зокрема «Теорія алгоритмів», «Інформаційні технології представлення, обробки та розпізнавання зображень» та «Прикладна теорія графів», що засвідчує їх високу навчально-методичну та прикладну цінність.

Повнота викладення основних результатів дисертації в опублікованих працях. Результати дисертаційного дослідження Федорченка М.А. достатньо повно висвітлені у наукових публікаціях та апробовані на міжнародних і вітчизняних наукових конференціях. За підсумками виконаної роботи опубліковано 9 наукових праць, серед яких 6 статей у фахових виданнях України категорії «Б» та 3 публікації у вигляді тез доповідей на наукових і науково-практичних конференціях. Із зазначених статей 3 виконано одноосібно, інші опубліковано у співавторстві, при цьому у двох працях здобувач має одного співавтора, що відповідно до чинних вимог зараховується як повноцінні публікації. Одна із наукових праць виконана у співавторстві з чотирма авторами та за встановленими критеріями зараховується як 0,5 публікації, що враховано при підсумковому обліку результатів. У сукупності здобувачеві зараховано 5,5 публікацій у фахових виданнях категорії «Б». У всіх роботах чітко визначено особистий внесок здобувача, який полягає у розробленні основних теоретичних і прикладних положень дослідження. Додатково результати оприлюднено у трьох тезах доповідей: одній на міжнародній науково-практичній конференції та двох на вітчизняних наукових заходах, що підтверджує належний рівень апробації отриманих результатів.

Структура і зміст дисертації. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 244 сторінки. Основний текст дисертаційної роботи викладено на 160 сторінках друкованого тексту та містить 42 таблиці і 62 рисунки. Список використаних джерел включає 223 найменування. Додатки подано на 38 сторінках. Структурно дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу, загальних висновків та списку використаних джерел.

У *вступі* дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність дослідження, спрямованого на розроблення нових інтелектуальних рішень для підвищення енергоефективності будівель. Чітко сформульовано мету та завдання дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Подано стисло характеристику основних результатів роботи, наведено відомості щодо їх апробації та публікацій, а також окреслено структуру дисертаційного дослідження.

У *першому розділі* дисертаційної роботи «Систематизація інформаційних технологій та їхніх компонентів в контексті пошуку та вибору альтернатив проектування енергоощадних будівель» здійснено комплексне узагальнення сучасних інформаційних технологій і їхніх складових у контексті задачі формування та вибору енергоефективних проектних рішень. Проаналізовано понятійно-категоріальний апарат, що описує взаємодію

штучного інтелекту та цифрових інформаційних систем як теоретичну основу для обґрунтованого вибору проєктних альтернатив із заданими енергетичними характеристиками. Розглянуто можливості BIM-технологій, цифрових моделей та суміжних IT-рішень як інструментальної бази автоматизації проєктного процесу в рамках життєвого циклу енергоефективних будівель. Okремо сформульовано постановку наукової задачі та гіпотезу дослідження щодо ефективності інтеграції методів штучного інтелекту в BIM-середовище з метою підвищення адаптивності та варіативності проєктних рішень. За результатами проведеного аналізу сформовано цілісне уявлення про структуру цифрового проєктування, взаємозв'язки між BIM, III, концепцією цифрового двійника та властивістю емерджентності складних інформаційних систем. Обґрунтовано перехід від традиційного лінійного підходу до адаптивної когнітивно-керованої парадигми проєктування, а також визначено роль BIM як інтеграційної платформи для поєднання геометричних, інженерних, аналітичних та сенсорних даних. Систематизовано основні інструментальні та аналітичні компоненти цифрового середовища та визначено дослідницькі завдання, що формують основу подальших розділів дисертації.

У *другому розділі* дисертаційної роботи «Методичні та функціонально-технічні компоненти застосування інформаційних технологій для автоматизованого проєктування енергоефективних будівель» обґрунтовано та розроблено методичні й алгоритмічні засади застосування штучного інтелекту та BIM для задач енергоефективного проєктування. Запропоновано інтегрований когнітивно-еволюційний підхід, який поєднує методи глибокого навчання, еволюційної оптимізації, нечіткої логіки та байесівських моделей для багатокритеріального аналізу проєктних рішень, оцінки ризиків та прогнозування енергетичних показників. Сформовано структуру вхідних даних на основі BIM-моделі, що включає геометричні, конструктивні та експлуатаційні параметри будівель як основу для побудови моделей машинного навчання. Розроблено математичні моделі нейронних мереж із визначенням функцій втрат та методів оптимізації, що забезпечують підвищення точності прогнозування. Використано еволюційні алгоритми для багатокритеріального вибору оптимальних проєктних конфігурацій, а також нечіткі моделі для роботи в умовах невизначеності вихідних даних. Додатково застосовано байесівські мережі для ймовірнісної оцінки ризиків у процесі прийняття рішень. Розроблена архітектура AI-BIM інтеграції забезпечує автоматизовану перевірку проєктних рішень, їх ранжування та візуалізацію результатів. Створено прототип програмного рішення, що

підтверджує практичну реалізованість запропонованого підходу та його прикладну цінність для задач енергоефективного проектування.

У *третьому розділі* дисертації «Аналітико-прикладне забезпечення та спрямування ІІІ на вибір варіантів енергоефективності будівель» досліджено прикладні аспекти використання штучного інтелекту для аналізу та оптимізації енергоефективності будівельних об'єктів. Розглянуто можливості моделювання теплотехнічних процесів із урахуванням геометричних, матеріальних і кліматичних факторів у контексті BIM-орієнтованого проектування. Розроблено інтегрований аналітичний простір, що поєднує дані цифрових моделей, сенсорних систем та проектної документації для оцінювання енергетичних характеристик будівель. Особливу увагу приділено застосуванню глибоких нейронних мереж для оцінки тепловтрат і ефективності огорожувальних конструкцій, що забезпечує високу точність прогнозування. Запропоновано використання генетичних алгоритмів і нечіткої логіки для оптимізації вибору теплоізоляційних матеріалів та конструктивних рішень. Додатково реалізовано підходи до прогнозування динаміки теплових втрат із використанням моделей часових рядів, зокрема LSTM/GRU та Prophet, що дозволяє враховувати сезонні та кліматичні зміни. Отримані результати забезпечують підвищення точності оцінювання енергоефективності та скорочення часу прийняття проектних рішень.

У *четвертому розділі* дисертації «Реалізація моделі та експериментальні дослідження» представлено архітектуру інтегрованої інформаційної системи, призначеної для перевірки ефективності запропонованих методів і моделей. Система об'єднує BIM-середовище, модулі штучного інтелекту, сенсорні дані та аналітичні компоненти в єдину когнітивно-орієнтовану платформу підтримки прийняття рішень. Реалізовано механізми потокової обробки інформації та циклічного оновлення моделей на основі нових даних, що забезпечує адаптивність системи до змін умов експлуатації. Запропонований підхід дозволяє здійснювати моніторинг енергоефективності в режимі, наближеному до реального часу, та формувати узагальнений індекс енергетичної ефективності будівель. Проведені експериментальні дослідження підтвердили працездатність розроблених моделей і їх здатність до адаптації в умовах варіативних вхідних даних. Урахування нормативних вимог та особливостей будівельної практики України забезпечує практичну значущість і прикладну орієнтованість запропонованої системи.

У *висновках* узагальнено основні наукові результати, які повністю відповідають меті та завданням дисертації.

Окрім того, в *додатках* містяться:

- список опублікованих наукових праць здобувача за темою дисертації;
- довідки про впровадження результатів дисертації в практику адміністрування проектами від підприємств та організацій: «Архітектурно-будівельні новації», «Інститут місцевого розвитку», «Альфа-сервіс»;
- код для побудови моделі глибокого навчання для прогнозування енергоспоживання будівлі на основі даних з BIM-моделі за допомогою TENSORFLOW та KERAS;
- застосування інструментальних BIM-компонентів: світова статистика відображає глобальні тенденції у використанні програмних засобів для інформаційного моделювання будівель (BIM) у різних сферах проектування, будівництва та експлуатації об'єктів;
- алгоритм еволюційного алгоритму для вибору оптимального енергоефективного проекту;
- код реалізації байєсівської мережі для оцінки ризиків при виборі енергоефективних будівель із використанням бібліотеки PGMPY в PYTHON;
- алгоритм моделі на основі нечіткої логіки для оцінки та вибору варіантів будівель щодо їх енергоефективності;
- інструкція для BIM-команди: інтеграція AI-оптимізації утеплення у BIM/IFC-модель;
- розділені таблиці модулів;
- реалізація глибокої LSTM-архітектури;
- приклади реалізованих кейсів та ключові індикатори ефективності (KPI).

Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності. Оформлення дисертаційної роботи повною мірою відповідає встановленим вимогам Міністерства освіти і науки України. Подана дисертація характеризується чіткою та логічно вибудованою структурою. Сформульовані висновки та практичні рекомендації безпосередньо впливають із отриманих результатів дослідження, які послідовно та узгоджено викладені у відповідних розділах. Змістове наповнення та стиль викладення свідчать про самостійний характер виконаної наукової роботи, індивідуальний підхід здобувача та оригінальність обраних шляхів розв'язання поставлених завдань. Текст дисертації викладено у науковому стилі з неухильним дотриманням принципів академічної доброчесності. Посилання на використані джерела є релевантними тематиці дослідження та оформлені відповідно до чинних вимог.

Ідентичність анотації та основних положень дисертаційної роботи. Анотація повною мірою відображає зміст дисертаційної роботи, при цьому

викладені в ній основні положення українською та англійською мовами є тотожними ключовим положенням дисертації та узгоджуються з її змістом.

Зауваження. У цілому дисертаційна робота отримує позитивну оцінку, однак доцільно звернути увагу на низку зауважень і рекомендацій, реалізація яких могла б сприяти подальшому підвищенню її наукового рівня та якості викладення результатів дослідження.

1) - у параграфі 1.1, на мій погляд, недостатньо повно відображено нормативно-правовий аспект, що регламентує процес фіксації пошкоджень будівельних об'єктів та формування відповідної звітної документації. Залучення положень чинних нормативних актів і стандартів дозволило б посилити прикладну складову дослідження. Це також сприяло б більш чіткому обґрунтуванню постановки задачі та підвищенню практичної значущості отриманих результатів.

2) - у параграфі 1.2 автором достатньо ґрунтовно розкрито інструментальні та візуально-графічні можливості BIM-середовищ і суміжних IT-рішень, однак виклад матеріалу має переважно описовий характер. Недостатньо чітко структуровано розмежування між функціональними можливостями окремих платформ та їх інтеграційною роллю в запропонованій системі. Доцільним було б більш акцентовано виділити критеріальну оцінку ефективності використання BIM-інструментів у задачах енергоефективного проєктування. Загалом підрозділ потребує посилення аналітичної складової та узагальнення отриманих результатів у контексті мети дослідження.

3) - текст параграфу 2.2 характеризується високим рівнем наукової насиченості та демонструє сучасне бачення інтеграції BIM і ІІІ, однак потребує певного доопрацювання в частині структуризації викладу та чіткого розмежування теоретичних положень і прикладної реалізації. Зокрема, окремі фрагменти містять надмірну деталізацію алгоритмічних процедур, що дещо ускладнює сприйняття основної логіки запропонованої моделі. Бажаним є також більш узгоджене подання нормативної складової (ДБН, ДСТУ) у контексті запропонованої AI-BIM системи для підсилення аргументації її практичної придатності. Крім того, доцільно більш чітко окреслити узагальнені висновки за результатами представленого прикладного моделювання для посилення цілісності наукового викладу.

4) - параграф 3.3 загалом має високий рівень науково-методичної опрацьованості та відображає сучасні підходи до побудови експертних AI-компонентів у цифровому середовищі будівель. Водночас виклад потребує певного уточнення щодо ієрархії взаємодії між окремими підсистемами (ML, IoT, сценарне моделювання) для більшої структурної прозорості

запропонованої архітектури. Окремі фрагменти містять надмірну деталізацію опису методів прогнозування, що дещо ускладнює виокремлення ключових інноваційних положень роботи.

5) - текст параграфу 4.2 містить ґрунтовний експериментальний матеріал, однак окремі положення щодо валідації прогнозної моделі потребують більш чіткого обґрунтування вибору вихідних даних та чутливості результатів до припущень моделювання. Також бажано уточнити межі застосовності отриманих результатів для інших кліматичних зон і типів будівель. Загалом висновки є переконливими, однак доцільно посилити їх статистичну верифікацію та порівняння з додатковими базовими моделями.

6) - зауваження в цілому до змісту 4 розділу: в дисертації недостатньо наочно продемонстровано приклад наскрізного застосування розроблених аналітичних інструментів, ІТ-технологій та програмних компонентів у єдиному інтегрованому циклі — від вихідних даних до формування альтернатив енергоощадності будівель, їх багатокритеріальної оцінки та остаточного вибору. Мова саме йде про наскрізний приклад. Бажано більш чітко візуалізувати практичну взаємодію модулів системи та послідовність їх роботи для підвищення рівня відтворюваності запропонованого підходу.

Сформульовані вище зауваження та окремі дискусійні положення мають переважно рекомендаційний характер, не впливають на загальну позитивну оцінку роботи та не знижують її високого наукового й прикладного рівня.

Загальний висновок офіційного опонента. На підставі всебічного та ґрунтовного аналізу дисертаційної роботи Федорченка Миколи Андрійовича встановлено, що вона є цілісним, завершеним і самостійно виконаним науковим дослідженням, у якому отримано нові, науково обґрунтовані результати, що мають істотне значення для розвитку галузі інформаційних технологій за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології».

Запропоновані автором теоретичні, методичні та прикладні положення щодо використання інтелектуальних інформаційних технологій, зокрема у сфері енергоефективного проектування будівель, характеризуються високим рівнем наукової опрацьованості, системністю та інноваційною спрямованістю, і становлять вагомий внесок у розвиток сучасних цифрових систем підтримки прийняття рішень. Одержані результати відзначаються належним ступенем наукової новизни, теоретичної значущості та практичної цінності, що підтверджує доцільність їх впровадження в інтелектуальні інформаційні системи та цифрові платформи будівельної галузі.

У цілому дисертаційна робота Федорченка Миколи Андрійовича відповідає встановленим вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора

філософії, зокрема її зміст повною мірою узгоджується з галуззю знань 12 «Інформаційні технології» та спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології», а також відповідає вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим Наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40 (зі змінами, внесеними відповідно до Наказу МОН України від 31.05.2019 № 759), і «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (у редакції постанови КМУ від 03 квітня 2024 р. № 507).

З огляду на викладене, вважаю, що дисертаційна робота відповідає всім установленим критеріям, а її автор — Федорченко Микола Андрійович — заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології».

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри програмних засобів
Національного університету
«Запорізька політехніка»



В. Вузьваси