

Відгук офіційного опонента

д.т.н., професор кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд **Трача Романа Володимировича** на дисертаційну роботу **Бикова Сергія Володимировича** на тему: **«Інформаційна технологія оцінки технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності із застосуванням методики кластеризації»**

1. **Актуальність теми дисертації.** Проблематика, яку досліджує Биков С.В., належить до найбільш перспективних напрямів розвитку сучасних інформаційних систем і технологій у будівельній галузі. У сучасних умовах експлуатації будівель і споруд істотно зростають вимоги до своєчасного виявлення ознак деградації конструкцій, прогнозування розвитку дефектів та обґрунтування управлінських рішень щодо забезпечення безпечної експлуатації об'єктів. Водночас практична реалізація таких завдань ускладнюється високою невизначеністю вихідної інформації, різномірністю джерел даних, наявністю вимірювальних похибок, неповнотою результатів обстежень та необхідністю інтегрування інструментальних і експертних оцінок у межах єдиного інформаційного середовища.

Особливого значення зазначена проблема набуває в умовах активного впровадження цифрових технологій у сферу будівництва, розвитку BIM-технологій, систем структурного моніторингу, цифрових двійників та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. За таких умов традиційні алгоритми класифікації технічного стану об'єктів дедалі частіше демонструють обмежену ефективність, оскільки вони здебільшого орієнтовані на роботу з детермінованими даними та недостатньо враховують властиву реальним експлуатаційним процесам невизначеність.

У цьому контексті дисертаційне дослідження, присвячене розробленню інформаційної технології оцінювання технічного стану об'єктів будівництва із застосуванням методики кластеризації, є своєчасним та науково обґрунтованим. Запропонований автором підхід поєднує сучасний математичний апарат нечітких множин, методи кластерного аналізу, генетичної оптимізації та програмної реалізації у вигляді спеціалізованої інформаційної технології, що забезпечує підвищення достовірності класифікації технічного стану будівельних об'єктів за наявності неоднорідних, неповних і шумових даних.

Актуальність роботи підтверджується також її відповідністю сучасним тенденціям розвитку спеціальності 126 – Інформаційні системи та технології, оскільки основний зміст дослідження спрямований на створення нових інформаційних моделей, алгоритмів, програмних компонентів та архітектурних рішень, що забезпечують інтелектуальну підтримку процесів аналізу даних і прийняття рішень у складних технічних системах. Важливо, що результати роботи мають міждисциплінарний характер і можуть бути використані як у сфері технічної діагностики будівель, так і під час розроблення інформаційних платформ цифрового моніторингу інженерних об'єктів.

Тема дисертаційної роботи є актуальною як із наукової, так і з практичної точки зору, відповідає сучасним напрямам розвитку інформаційних технологій, а поставлені автором завдання мають важливе значення для вдосконалення методів інтелектуального оцінювання технічного стану будівельних об'єктів.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційне дослідження узгоджується з пріоритетними напрямками розвитку наукової, інноваційної та цифрової сфери України, зокрема положеннями Законів України «Про наукову і науково-технічну діяльність» № 848-VIII, «Про інноваційну діяльність» № 40-IV та «Про Національну програму інформатизації» № 2807-IX. Отримані результати відповідають сучасним пріоритетам цифрового вдосконалення будівельної галузі на основі інформаційних технологій, інтелектуального аналізу даних, цифрового моніторингу та автоматизованої підтримки прийняття рішень. Методичні, математичні, інформаційно-аналітичні та програмні результати роботи спрямовані на розвиток інтелектуальних інформаційних систем оцінювання технічного стану будівель і споруд.

Дослідження виконано на кафедрі інформаційних технологій проєктування та прикладної математики Київського національного університету будівництва і архітектури відповідно до напрямів її науково-дослідної діяльності. Дисертація відповідає предметній області спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» та орієнтована на розвиток методів оброблення невизначених даних, кластеризації й інтелектуального аналізу інформації. Запропонована технологія Clustering4Build забезпечує інтеграцію математичних методів, програмних компонентів і цифрових даних технічного моніторингу, створюючи інформаційне підґрунтя для підвищення надійності, безпеки та ефективності експлуатації

будівельних об'єктів. Отримані результати мають наукове та прикладне значення для подальшого розвитку цифрових технологій у будівництві

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Дисертаційна робота характеризується належним рівнем наукової аргументованості та внутрішньої логічної узгодженості. Усі положення, винесені на захист, ґрунтуються на системному аналізі сучасних підходів до оцінювання технічного стану об'єктів будівництва, послідовному застосуванні математичного апарату нечіткої кластеризації, використанні інтервальних нечітких множин другого типу та генетичних алгоритмів оптимізації, а також на результатах програмної реалізації й експериментальної перевірки запропонованої інформаційної технології. Високий ступінь обґрунтованості отриманих результатів забезпечується комплексним характером дослідження. Автор не обмежується розробленням окремих алгоритмічних рішень, а формує цілісну інформаційну технологію, у якій математичні моделі, алгоритми кластеризації, програмні компоненти та механізми підтримки прийняття рішень взаємопов'язані між собою і реалізують єдину функціональну концепцію оцінювання технічного стану об'єктів будівництва.

Слід відзначити, що логіка викладення матеріалу є послідовною та переконливою. Від аналізу існуючих методів і визначення їхніх обмежень автор переходить до формування власної концепції інформаційної технології, далі обґрунтовує математичні моделі нечіткої кластеризації, розробляє алгоритмічне забезпечення, після чого реалізує запропоновані рішення у вигляді програмного комплексу та підтверджує їх ефективність результатами експериментальних досліджень. Така побудова роботи забезпечує логічний взаємозв'язок між поставленими завданнями, методами дослідження та отриманими висновками. Достовірність сформульованих висновків підтверджується використанням сучасних методів математичного моделювання, генетичної оптимізації, нечіткої кластеризації, експериментальними дослідженнями, аналізом показників якості кластеризації та програмною реалізацією запропонованих алгоритмів у складі інформаційної технології Clustering4Build. Запропоновані рішення пройшли експериментальну перевірку на наборах даних різної структури та продемонстрували можливість адаптивного формування кластерів за умов високого рівня невизначеності. Важливою перевагою є те, що більшість сформульованих наукових положень доведено не лише теоретично, але й

підтверджено результатами програмної реалізації. Автор реалізував спеціалізовані програмні модулі, побудував мікросервісну архітектуру інформаційної технології, інтегрував алгоритми кластеризації із системою підтримки прийняття рішень та забезпечив можливість взаємодії із сучасними цифровими платформами моніторингу технічного стану будівельних об'єктів. Саме поєднання математичного, алгоритмічного та програмно-технологічного рівнів дослідження свідчить про високий ступінь обґрунтованості основних положень дисертації.

У цілому сформульовані автором наукові положення, висновки та практичні рекомендації є логічно взаємопов'язаними, впливають із результатів проведених досліджень, достатньо аргументовані та підтверджені наведеними у дисертації теоретичними й експериментальними матеріалами, що дає підстави вважати їх достовірними та належним чином обґрунтованими.

4. Наукова новизна отриманих автором результатів. Наукова новизна дисертаційної роботи Бикова С.В. визначається не окремим локальним удосконаленням відомих алгоритмів, а побудовою цілісної інформаційної технології оцінювання технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності. Автором науково обґрунтовано інформаційну технологію Clustering4Build, у межах якої поєднано апарат нечітких множин першого та другого типів, інтервальні моделі подання невизначеності, алгоритми FCM і PCM, генетичну оптимізацію параметрів та засоби підтримки прийняття рішень. Така інтеграція створює єдине адаптивне середовище для кластеризації технічних станів за неоднорідними, неповними та шумовими даними. До найбільш значущих результатів, що характеризують наукову новизну, належить удосконалення інформаційної технології Clustering4Build шляхом інтегрування методів нечіткої кластеризації з генетичним налаштуванням параметрів. Це забезпечило адаптивне групування об'єктів з урахуванням перехідних технічних станів, різної структури даних і невизначеності результатів моніторингу. На відміну від жорсткої класифікації, запропонований підхід дає змогу відобразити часткову належність об'єкта до декількох кластерів, що є важливим для діагностування конструкцій, стан яких не може бути однозначно віднесений до однієї категорії.

Вагомим науковим результатом є розширення множини об'єктів кластеризації до інтервальних нечітких множин другого типу для PCM-алгоритму. Такий підхід дозволив враховувати невизначеність фазифікатора та

параметра «ширини зони» окремо для кожного кластера. Його реалізація через модулі FuzzificationEngine і TypeReducer забезпечує обчислення інтервальних функцій типовості та центрів кластерів, а використання GA-Optimizer і QualityEvaluator дає можливість автоматизовано визначати параметри моделі та оцінювати якість одержаного кластерного розподілу.

Удосконалено також комбіновані алгоритми FCM+GA та PCM+GA стосовно завдань технічного моніторингу будівельних об'єктів. Їх особливістю є автоматизоване визначення центрів кластерів, параметрів фазифікації та ступенів приналежності з урахуванням специфіки неповних і шумових даних. Генетична оптимізація застосовується не як автономний обчислювальний елемент, а як складова замкненого процесу вибору параметрів, виконання кластеризації, оцінювання результатів та формування рекомендацій. Це забезпечує підвищення стійкості збіжності, точності та відтворюваності результатів. Окреме місце в науковій новизні посідає науково-прикладне обґрунтування мікросервісної архітектури з REST-взаємодією між компонентами системи. Запропонована архітектура забезпечує централізоване збереження результатів, модульність, масштабованість та інтеграцію з DSS, BIM-моделями, IoT-потокami і базою даних PostgreSQL. Вона реалізує замкнений цикл «оптимізація – аналіз – рекомендація – візуалізація», що поєднує алгоритмічний та інформаційно-технологічний рівні дослідження.

Подальшого розвитку набули науково-методичні засади побудови інформаційних технологій оцінювання технічного стану будівель за умов невизначеності. Авторський підхід базується на спільному використанні інструментальних вимірювань, експертних оцінок, нечіткої кластеризації та інтервальних моделей представлення знань. Це створює передумови для формалізації перехідних станів конструкцій, адаптивного оброблення різнорідних даних і побудови універсального програмного інструментарію для кластерного аналізу технічного стану.

Отже, наукова новизна результатів має системний характер і охоплює методичний, математичний, алгоритмічний та програмно-архітектурний рівні. Одержані результати не дублюють наявні підходи, а розширюють можливості інформаційних технологій технічного моніторингу щодо роботи з невизначеною, неоднорідною та неповною інформацією.

5. Теоретичне та практичне значення одержаних результатів.

Теоретичне значення дисертаційного дослідження полягає у розвитку наукових засад побудови інформаційних технологій для оцінювання технічного стану складних об'єктів за умов невизначеності. Автором сформовано цілісне представлення процесу діагностування, у якому дані моніторингу не розглядаються як сукупність незалежних числових показників, а перетворюються на структуровану інформаційну модель з урахуванням їх неповноти, шуму, неоднорідності та можливості існування перехідних станів. Важливим є розвиток комбінованих методів FCM+GA та PCM+GA. У межах запропонованого підходу генетичний алгоритм виконує функцію адаптивного налаштування кластерної моделі, а не лише пошуку одного числового параметра. Оптимізації підлягають центри кластерів, параметри фазифікації, ступені приналежності та параметри «ширини зони». Така побудова розширює методичні можливості нечіткої кластеризації та створює підґрунтя для її застосування до інших класів інформаційних систем, у яких необхідно працювати з багатопараметричною невизначеністю. Не менш значущим є теоретичне обґрунтування замкненого циклу оброблення даних «оптимізація – аналіз – рекомендація – візуалізація». Цей цикл пов'язує математичне налаштування моделі, оцінювання якості кластеризації, інтерпретацію результатів і формування рекомендацій у межах однієї інформаційної технології. Такий підхід розвиває засади проєктування інтелектуальних інформаційних систем, у яких результат обчислення має бути не лише отриманий, але й перевірений, інтерпретований та представлений користувачеві у формі, придатній для прийняття рішення.

Практичне значення роботи визначається створенням інформаційної технології Clustering4Build, орієнтованої на автоматизоване оцінювання технічного стану будівельних об'єктів. Її функціональні можливості охоплюють оброблення неоднорідних, неповних і шумових даних, автоматизований добір параметрів нечітких кластеризаторів, визначення центрів кластерів, оцінювання якості отриманих моделей, візуалізацію результатів та формування рекомендацій для інженерів. Практичну цінність мають створені програмні модулі GA-Optimizer, TypeReducer, QualityEvaluator, FCM-Core, FuzzificationEngine та DSS. GA-Optimizer забезпечує еволюційний пошук параметрів кластеризації; TypeReducer виконує процедури зниження типу для інтервальних нечітких множин другого типу; QualityEvaluator визначає показники якості, зокрема загальний гіпероб'єм та індекс сферичності; DSS забезпечує інтерпретацію та

представлення одержаних результатів. Взаємодія цих модулів формує єдиний програмний контур оброблення даних. Мікросервісна реалізація Clustering4Build дає змогу окремо масштабувати функціональні компоненти, оновлювати алгоритми без перебудови всієї системи та інтегрувати технологію із зовнішніми цифровими середовищами. REST-взаємодія між модулями, використання PostgreSQL і збереження структурованих результатів у форматі JSONB підтримують відтворюваність обчислювальних експериментів та аудит отриманих рішень.

Важливим напрямом практичного використання є інтеграція Clustering4Build з BIM-моделями, IoT-сенсорами, SHM- та DSS-системами. Архітектура технології передбачає надходження даних від засобів моніторингу, їх подальше оброблення, кластеризацію, оцінювання якості та представлення результатів у системі підтримки прийняття рішень. Це дозволяє використовувати розроблені засоби для комплексного моніторингу конструкцій і підготовки рекомендацій щодо їх безпечної експлуатації.

Прикладна спрямованість результатів полягає також у можливості адаптації технології до різних типів будівельних об'єктів і структури моніторингових даних. Завдяки використанню генетичної оптимізації та інтервальних нечітких моделей система не обмежується фіксованим набором параметрів, а може налаштовуватися відповідно до характеристик конкретного інформаційного масиву. Це підвищує стійкість і відтворюваність оцінювання та розширює сферу потенційного застосування технології. Так, теоретичне значення одержаних результатів полягає у розвитку методології інтелектуальної обробки невизначених даних у системах технічного моніторингу, а практичне — у створенні завершеного програмно-алгоритмічного середовища, придатного для автоматизованої кластеризації, оцінювання, візуалізації та підтримки інженерних рішень щодо технічного стану об'єктів будівництва.

6. Повнота викладення основних результатів дисертації в опублікованих працях. Основні наукові положення та результати дисертаційної роботи Бикова С.В. відображено в публікаціях, тематичне спрямування яких відповідає меті, завданням і змісту проведеного дослідження. У переліку праць за темою дисертації представлені статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», а також публікації у закордонних періодичних виданнях, прирівняних до фахових за умови їх індексації або цитування. Публікації

здобувача Бикова С.В. охоплюють проблематику прогнозування надійності прийняття рішень у системах діагностики технічного стану будівель, організації механізмів забезпечення експлуатаційної безпеки, побудови аналітичних і діагностичних блоків цифрового середовища, визначення пошкоджень засобами інформаційних систем та програмно-технічного забезпечення діагностики будівельних об'єктів. Отже, представлені праці відображають не лише загальну предметну сферу дисертації, а й окремі складові розробленої інформаційної технології — від аналітичного опрацювання даних і прогнозування до програмної реалізації та підтримки прийняття рішень. Важливо, що опубліковані результати простежуються у структурі дисертації та кореспондують із її основними науковими результатами. Положення щодо прогнозування достовірності рішень пов'язані з формуванням інформаційно-аналітичного середовища технічного моніторингу; дослідження механізмів експлуатаційної безпеки відповідають прикладному спрямуванню технології; розроблення аналітичних і діагностичних блоків узгоджується з архітектурою Clustering4Build; праці, присвячені програмно-технічному комплексу, відображають результати програмної реалізації, наведені у четвертому розділі.

Зміст публікацій підтверджує послідовність авторського наукового пошуку. Спочатку акцент зроблено на інформаційному забезпеченні діагностики та надійності прийняття рішень, далі — на механізмах функціонування систем безпеки та цифрових блоках оцінювання структурної надійності, після чого увагу зосереджено на програмно-технічній реалізації системи діагностики. Така тематична послідовність відповідає переходу від постановки науково-прикладного завдання до створення цілісної інформаційної технології. Наведені в дисертації публікації мають безпосередній зв'язок із результатами, винесеними на захист. Вони висвітлюють питання формування інформаційних моделей технічного моніторингу, аналітичного опрацювання результатів діагностики, організації цифрового середовища та створення програмного комплексу. Водночас результати, пов'язані з використанням нечітких множин, комбінованими алгоритмами кластеризації, генетичною оптимізацією та мікросервісною архітектурою, системно узагальнені безпосередньо в дисертаційній роботі.

Представлений перелік опублікованих праць дозволяє зробити висновок, що основні результати дослідження належним чином оприлюднені. Тематика публікацій відповідає спеціальності 126 – Інформаційні системи та технології, а

їхній зміст відображає ключові складові розробленої інформаційної технології оцінювання технічного стану об'єктів будівництва.

Таким чином, основні теоретичні, методичні та програмно-прикладні результати дисертації достатньо повно представлені в опублікованих працях здобувача, а характер цих публікацій підтверджує їх відповідність змісту й науковому спрямуванню дисертаційного дослідження.

7. Оцінка опонентом змісту та структури дисертаційної роботи. Зміст дисертаційної роботи сформовано відповідно до послідовності розв'язання поставлених наукових завдань. Її структура охоплює анотації, перелік публікацій здобувача, зміст, вступ, чотири розділи основної частини, загальні висновки, список використаних джерел і додатки. Така композиція забезпечує поступовий перехід від аналізу теоретичних передумов оцінювання технічного стану до розроблення математичних методів, алгоритмів і програмного середовища Clustering4Build.

У вступі визначено науково-прикладне спрямування роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, окреслено його об'єкт, предмет і методичну основу, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Вступна частина формує цілісне уявлення про логіку дослідження й визначає місце розроблюваної інформаційної технології у системах оцінювання технічного стану будівельних об'єктів.

У першому розділі сформовано концептуально-теоретичну базу оцінювання технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності. Автором обґрунтовано доцільність використання нечітких та інтервальних моделей подання знань, проаналізовано можливості нечіткої кластеризації для врахування перехідних станів конструкцій, різномірності та неповноти вхідної інформації. Розглянуто сучасні BIM-, SHM- та DSS-рішення, встановлено обмеженість їхніх аналітичних можливостей щодо адаптивної кластеризації й визначено необхідність створення інтегрованої інформаційної технології, здатної поєднувати різні джерела моніторингових даних. Перший розділ виконує не лише оглядову, а й постановчу функцію. На основі аналізу існуючих підходів автор визначає наукові суперечності, які потребують вирішення: між значним обсягом даних технічного моніторингу та обмеженими можливостями їх інтелектуального опрацювання; між необхідністю формалізації перехідних станів і жорсткістю

традиційних класифікаційних моделей; між різномірністю інформаційних потоків та відсутністю універсального інструментарію їх інтегрованого аналізу.

У другому розділі розроблено науково-методичне підґрунтя комбінованих методів кластеризації FCM+GA та PCM+GA. Основну увагу приділено адаптивному визначенню центрів кластерів, ступенів приналежності та параметрів фазифікації в умовах шумових, неповних і неоднорідних даних. Генетична оптимізація використовується для підвищення стійкості та ефективності нечіткої кластеризації, а запропоновані алгоритмічні рішення орієнтовано на включення до складу інформаційної технології Clustering4Build. У цьому ж розділі закладено архітектурну основу функціонування окремих програмних компонентів, пов'язаних із фазифікацією, кластерним аналізом, оптимізацією параметрів та підтримкою прийняття рішень. Значущість другого розділу полягає в тому, що він забезпечує перехід від загальної концепції до формалізованих методів і алгоритмів, які можуть бути реалізовані програмними засобами. Результати контрольних прикладів демонструють переваги поєднання FCM і PCM із генетичною оптимізацією порівняно з використанням відповідних кластерних методів без адаптивного налаштування параметрів.

У третьому розділі розвинено математичний апарат кластеризації на основі інтервальних нечітких множин другого типу. Автором розглянуто невизначеність фазифікатора в FCM-алгоритмі та параметрів «ширини зони» в PCM-алгоритмі, а розширення множини об'єктів кластеризації до IHMT2 використано як засіб формалізації невизначеності самих меж кластерів. Зміст третього розділу включає розроблення процедур формування інтервальних функцій приналежності й типовості, визначення інтервальних центрів кластерів, застосування алгоритмів зниження типу та генетичного пошуку оптимальних параметрів. Для оцінювання результатів використовуються показники якості кластеризації, зокрема гіпероб'єм та індекс сферичності. Розглянуто проблему вибору між моделями на основі нечітких множин першого типу та інтервальних нечітких множин другого типу залежно від структури даних. Наведені в третьому розділі обчислювальні експерименти підтверджують доцільність застосування PCM-алгоритму на основі IHMT2 для множин об'єктів, що істотно відрізняються за щільністю та об'ємом. Отримані результати доповнюють методи, розроблені в попередньому розділі, засобами врахування невизначеності кластерних меж і формують математичну основу для наступної програмної реалізації.

У четвертому розділі представлено програмну реалізацію методів кластеризації та побудову інформаційної технології Clustering4Build. Розроблений пакет прикладних програм орієнтований на багатокритеріальну кластеризацію множин, що можуть містити як однорідні кластери, так і групи об'єктів із суттєво різною щільністю або об'ємом. Програмну реалізацію побудовано за мікросервісним принципом із REST-взаємодією між компонентами. У межах технології реалізовано модулі фазифікації, генетичної оптимізації, зниження типу, оцінювання якості кластеризації, вибору моделі та підтримки прийняття рішень. Централізоване збереження результатів у PostgreSQL із використанням формату JSONB спрямоване на забезпечення відтворюваності обчислювальних експериментів та можливості подальшого аналізу результатів. Завершальний розділ демонструє перетворення розробленого математичного та алгоритмічного апарату на функціональне програмне середовище. Передбачена інтеграція з BIM-моделями, IoT-потокami та DSS формує технологічну основу для використання Clustering4Build у комплексних системах технічного моніторингу. Реалізований цикл «оптимізація – аналіз – рекомендація – візуалізація» забезпечує взаємозв'язок між автоматизованим опрацюванням даних і формуванням результатів, придатних для інженерної інтерпретації.

Загальні висновки узгоджуються зі змістом розділів і відображають результати розв'язання поставлених завдань. У них систематизовано положення щодо створення Clustering4Build, удосконалення комбінованих методів FCM+GA та PCM+GA, використання IHMT2, генетичного налаштування параметрів, розроблення програмних модулів і побудови мікросервісного інформаційного середовища.

Отже, зміст дисертації характеризується структурною впорядкованістю, послідовністю розкриття наукового задуму та змістовним взаємозв'язком між теоретичною, математичною, алгоритмічною й програмно-прикладною частинами. Кожний розділ має визначене функціональне призначення, а сукупність представлених результатів формує завершене вирішення поставленого науково-прикладного завдання.

8. Зауваження та дискусійні положення по дисертаційній роботі. Разом із високою оцінкою наукового рівня виконаного дослідження, його актуальності, практичної значущості та отриманих результатів, до дисертаційної роботи доцільно висловити окремі зауваження та побажання, які мають переважно

дискусійний, редакційний і рекомендаційний характер та не знижують загальної позитивної оцінки дослідження.

1). На стор. 56 дисертації, де наведено рис. 1.1 «Задача кластеризації технічного стану будівельних об'єктів з довільною кількістю елементів моніторингу», доцільно було б більш детально відобразити механізм формування множини інформативних елементів моніторингу та критерії введення так званого «уявного» елемента із нульовим рівнем зношеності. Наведена концептуальна схема достатньо повно ілюструє загальну постановку задачі, однак її інформативність могла б бути підвищена шляхом графічного відображення взаємозв'язку між процедурою вибору елементів моніторингу, визначенням кількості кластерів та подальшим формуванням вхідних даних для алгоритму кластеризації. Таке уточнення сприяло б більш однозначному сприйняттю запропонованої інформаційної технології та полегшило б її практичне використання.

2). На стор. 64–65 дисертації перед табл. 1.2 «Вхідні параметри та характеристики об'єктів будівництва» відсутнє безпосереднє текстове посилання на зазначену таблицю. Хоча після її наведення автор детально характеризує склад вхідних параметрів та їх роль у формуванні вектора ознак об'єкта будівництва, доцільно було б перед розміщенням таблиці вказати, що відповідні параметри систематизовано саме у табл. 1.2. Таке редакційне уточнення покращило б логічну послідовність викладу матеріалу та відповідало б усталеним вимогам до оформлення наукових досліджень.

3) На стор. 74 дисертації, де наведено рис. 2.2 «Архітектура програмного модуля нечіткої формалізації технічних показників у складі IC Clustering4Build», архітектурна схема достатньо повно відображає основні програмні компоненти та послідовність оброблення даних. Разом із тим доцільно було б деталізувати інформаційні потоки між API-інтерфейсом, базою даних PostgreSQL та модулем кластеризації, а також конкретизувати напрям передачі результатів оброблення після завершення процедури кластеризації. Таке доповнення зробило б архітектурну модель більш завершеною з позицій реалізації інформаційної технології та полегшило б відтворення запропонованого програмного рішення іншими дослідниками.

4). На стор. 84 дисертації під час опису генетичного алгоритму з хромосомою постійної довжини наведено математичний апарат ймовірнісного відбору, зокрема формули (2.5)–(2.6), після чого зазначено про реалізацію

алгоритму засобами бібліотеки multiprocessing у Python. Водночас доцільно було б більш детально описати механізм синхронізації паралельних процесів та критерії завершення ітерацій генетичного алгоритму в умовах багатопотокового виконання. Таке уточнення дозволило б повніше оцінити особливості програмної реалізації запропонованого алгоритму та підвищило б відтворюваність отриманих результатів іншими дослідниками.

5). На стор. 194 дисертації, де наведено табл. 4.2 «Перелік основних компонентів та інтерфейсів», доцільно було б доповнити її окремими характеристиками функціональної взаємодії між програмними компонентами, зокрема зазначити формати обміну даними, основні вхідні та вихідні параметри інтерфейсів, а також типи повідомлень, що передаються між окремими мікросервісами системи Clustering4Build. Таке розширення інформаційного наповнення таблиці дозволило б повніше розкрити особливості програмної архітектури запропонованої інформаційної технології та полегшило б її подальшу практичну реалізацію й інтеграцію з іншими інформаційними системами.

6) На стор. 145 дисертації, де наведено рис. 3.11 «Алгоритм генетичної оптимізації m_1, m_2 », графічне подання алгоритму виконано у вертикальному форматі із досить дрібним шрифтом, що ускладнює сприйняття окремих елементів схеми та текстових позначень. Доцільно було б збільшити масштаб рисунка та подати його у горизонтальній орієнтації сторінки, що забезпечило б кращу читабельність алгоритму, полегшило аналіз послідовності його виконання та підвищило загальну наочність представленого матеріалу.

7). Позитивно оцінюючи представлений на стор.202-205 склад пакету прикладних програм Clustering4Build, слід відзначити його функціональну повноту та логічне поєднання обчислювальних, оптимізаційних, інформаційних і підтримувальних компонентів. Обґрунтованим є виокремлення модулів FCM-Core, GA-Optimizer, TypeReducer, QualityEvaluator та DSS, доповнених засобами зберігання й інформаційної взаємодії. Водночас опис окремих компонентів пакету має переважно функціональний характер і міг би бути доповнений більш чітким визначенням інформаційних входів і виходів, послідовності їх взаємодії та ролі кожного модуля у загальному алгоритмі роботи технології. Зокрема, доцільно було б графічно або таблично деталізувати інформаційні зв'язки між основними мікросервісами та DSS. Таке уточнення сприяло б кращому розумінню архітектурної цілісності Clustering4Build та відтворюваності запропонованого автором програмно-інформаційного рішення. Висловлене зауваження має

рекомендаційний характер і не зменшує практичної цінності розробленого пакету прикладних програм.

8) На стор. 289 (Додаток 9), де наведено Activity Diagram для модуля TypeReducer, доцільно було б збільшити масштаб рисунка та розмір шрифту всередині блоків, оскільки окремі текстові елементи схеми сприймаються недостатньо чітко. Крім того, для покращення наочності варто візуально виокремити основні етапи алгоритму різними кольорами або графічними акцентами, що полегшило б аналіз логіки виконання процесу.

Висловлені вище зауваження та окремі дискусійні положення мають переважно уточнювальний і рекомендаційний характер, спрямовані на подальше вдосконалення окремих аспектів дослідження та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи. Вони не знижують її наукової цінності, практичної значущості та належного рівня розробленого автором інформаційно-технологічного інструментарію.

9. Загальний висновок. Дисертаційна робота Бикова Сергія Володимировича на тему «Інформаційна технологія оцінки технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності із застосуванням методики кластеризації», подана на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 – Інформаційні системи та технології, є завершеним, самостійно виконаним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальне науково-прикладне завдання розроблення інформаційної технології інтелектуальної оцінки технічного стану об'єктів будівництва в умовах неповноти, неоднорідності та невизначеності вхідних даних із використанням сучасних методів нечіткої кластеризації та генетичної оптимізації.

Отримані автором наукові результати характеризуються належним рівнем наукової новизни, теоретичної обґрунтованості та практичної цінності. Достовірність сформульованих положень підтверджується використанням сучасного математичного апарату, інформаційних технологій, програмною реалізацією запропонованих моделей, результатами експериментальних досліджень, апробацією на наукових конференціях та достатньою кількістю наукових публікацій. Наукові положення, висновки та рекомендації є логічно обґрунтованими, а запропонована інформаційна технологія має практичне значення для підвищення ефективності моніторингу та оцінювання технічного стану будівельних об'єктів. Висловлені зауваження мають переважно

рекомендаційний, редакційний та дискусійний характер, спрямовані на подальше вдосконалення представленого дослідження і не знижують його загальної наукової та практичної цінності. За актуальністю теми, рівнем наукової новизни, обґрунтованістю отриманих результатів, теоретичним і практичним значенням, повнотою їх апробації та публікації, а також якістю оформлення дисертаційна робота Бикова Сергія Володимировича відповідає вимогам 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 (зі змінами), а також вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Вважаю, що Биков Сергій Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 – Інформаційні системи та технології.

Офіційний опонент

д.т.н., професор кафедри промислового,
цивільного будівництва та інженерних споруд
Національного університету водного
господарства та природокористування



Роман ТРАЧ

