

Відгук офіційного опонента

д.т.н., професора, професора кафедри біомедичної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» **КУЧАНСЬКОГО Олександра Юрійовича** 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 дисертаційного дослідження.

Дисертаційне дослідження Бикова С.В. присвячене вирішенню актуального науково-прикладного завдання, що полягає у розробленні інформаційної технології оцінювання технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності із застосуванням методів кластеризації. Обрана тематика відповідає тенденціям розвитку інформаційних систем і технологій, пов'язаним із цифровізацією процесів моніторингу, інтелектуального аналізу даних та підтримки прийняття рішень у сфері експлуатації будівель і споруд. Сам автор пов'язує актуальність задачі, зокрема, зі значним масштабом пошкодження житлового фонду України, старінням інфраструктури та потребою оперативного оцінювання технічного стану об'єктів.

Актуальність роботи визначається також тим, що дані технічного моніторингу характеризуються неповнотою, неоднорідністю, наявністю шумів, невизначеністю результатів інструментальних вимірювань та суб'єктивністю експертних оцінок. За таких умов застосування лише класичних детермінованих методів не завжди дозволяє адекватно враховувати розмитість меж між окремими технічними станами конструкцій. Це обумовлює доцільність використання інтелектуальних методів оброблення даних, зокрема нечіткої та можливісної кластеризації, інтервальних моделей подання невизначеності та методів оптимізації параметрів. У дисертації відповідна науково-прикладна задача формулюється як створення інтегрованої інформаційної технології, здатної забезпечувати формалізоване представлення даних інструментального й

експертного моніторингу, їх інтелектуальне оброблення та адаптивну кластеризацію. Важливою особливістю дослідження є його орієнтація не лише на вдосконалення окремих алгоритмів кластеризації, а на створення інтегрованої інформаційної технології Clustering4Build. Вона поєднує апарат нечітких множин першого типу та інтервальних нечітких множин другого типу, алгоритми FCM і PCM, генетичну оптимізацію параметрів, засоби оцінювання якості кластеризації та підтримки прийняття рішень. У роботі реалізовано відповідні програмні модулі, зокрема FuzzificationEngine, FCM-Core, PCM-Core, TypeReducer, GA-Optimizer, QualityEvaluator та ModelSelector.

Не менш важливим є практичний аспект виконаного дослідження. Інформаційна технологія Clustering4Build реалізована на основі мікросервісної архітектури з REST-взаємодією між компонентами, централізованим збереженням даних і результатів обчислень у СУБД PostgreSQL з використанням формату JSON/JSONB та можливістю інтеграції з BIM-моделями, IoT-потокami даних і системою підтримки прийняття рішень. Така організація забезпечує модульність, технологічну незалежність компонентів, відтворюваність обчислювальних експериментів і створює передумови для масштабування інформаційної технології. Практична спрямованість роботи додатково підтверджується апробацією розробленої технології на даних технічного моніторингу та наявністю актів впровадження. У дисертації зазначено, що результати автоматизованої кластеризації зіставлялися з категоріями технічного стану, визначеними за результатами інструментальних обстежень та експертного оцінювання.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Бикова С.В. є актуальною, оскільки спрямована на розвиток інформаційних технологій автоматизованого оцінювання технічного стану об'єктів будівництва за умов невизначеності, неповноти та неоднорідності даних із використанням методів інтелектуального аналізу та підтримки прийняття рішень.

2.Відповідність теми та змісту дослідження паспорту спеціальності.

Тема, мета, завдання, наукові положення та отримані результати дисертаційної роботи повною мірою відповідають паспорту спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» галузі знань 12 «Інформаційні технології». Це підтверджується спрямованістю дослідження на створення нової інформаційної технології, розроблення математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення, а також побудову інтегрованої архітектури інформаційної системи підтримки оцінювання технічного стану будівельних об'єктів. Основний зміст дисертації зосереджений на розробленні методів інтелектуальної обробки даних, побудові математичних моделей нечіткої кластеризації, створенні алгоритмів генетичної оптимізації параметрів, проектуванні мікросервісної архітектури програмного комплексу та інтеграції його із сучасними цифровими платформами моніторингу. У роботі сформовано завершену інформаційну технологію Clustering4Build, яка включає взаємопов'язані програмні модулі FuzzificationEngine, TypeReducer, GA-Optimizer, QualityEvaluator, аналітичне ядро кластеризації та компоненти підтримки прийняття рішень. Саме такі результати належать до предметної області інформаційних систем і технологій, оскільки охоплюють питання створення інформаційних моделей, алгоритмів, програмних компонентів та інтелектуальних інформаційних систем.

Структура дисертації також підтверджує її відповідність спеціальності 126. У першому розділі виконано системний аналіз сучасних підходів до оцінювання технічного стану об'єктів та інформаційних технологій моніторингу. Другий розділ присвячений розробленню математичного й алгоритмічного забезпечення інформаційної технології, третій – розвитку методів нечіткої кластеризації та їх інтелектуальній оптимізації, четвертий – програмній реалізації інформаційної технології, побудові мікросервісної архітектури, інтеграції із BIM, IoT, DSS та дослідженню ефективності створеного програмного комплексу. Така логіка дослідження повністю відповідає науковому напрямку спеціальності «Інформаційні системи та технології».

Водночас необхідно відзначити, що будівельна галузь у даній роботі виступає не предметом спеціальності, а прикладною сферою використання розробленої інформаційної технології. Основні наукові результати стосуються саме розвитку інформаційних технологій, методів інтелектуальної обробки даних, програмної інженерії та побудови спеціалізованих інформаційних систем, що повністю узгоджується з об'єктом, предметом та напрямками досліджень спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології». Отже, тема дисертаційної роботи, її структура, методологія дослідження, використаний математичний апарат, алгоритмічне забезпечення, програмна реалізація та одержані наукові результати повністю відповідають паспорту спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» та можуть бути віднесені до її наукового напрямку.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень дисертаційної роботи Бикова С.В.

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі Бикова С.В., є загалом достатньо обґрунтованими, взаємопов'язаними та логічно узгодженими зі структурою проведеного дослідження. Автор послідовно переходить від аналізу сучасного стану проблеми та формулювання науково-прикладного завдання до розроблення математичного й алгоритмічного забезпечення, програмної реалізації інформаційної технології та експериментальної перевірки рішень.

Належний рівень обґрунтованості одержаних результатів забезпечується використанням комплексу взаємопов'язаних методів, що включає апарат нечітких множин першого типу та інтервальних нечітких множин другого типу, алгоритми нечіткої кластеризації FCM та можливісної кластеризації PCM, ітераційний алгоритм Карника–Менделя для процедури зниження типу, генетичні алгоритми оптимізації параметрів, а також запропоновані показники оцінювання якості кластеризації H та Sph . Розроблені математичні та алгоритмічні засоби реалізовано у складі інформаційної технології Clustering4Build, побудованої на основі мікросервісної архітектури.

Логіка формування основних наукових результатів простежується від аналізу існуючих BIM-, SHM-, DSS- та AI/ML-рішень до визначення вимог щодо інтегрованої інформаційної технології, здатної працювати з неоднорідними та невизначеними даними. У дисертації показано, що наявні системи переважно орієнтовані на зберігання, візуалізацію, пороговий або спеціалізований аналіз даних та не забезпечують комплексного поєднання адаптивної кластеризації з формалізованим урахуванням невизначеності. На цій основі автором сформовано інформаційну технологію Clustering4Build, розроблено та досліджено алгоритмічні підходи FCM+GA і PCM+GA, поширено PCM-алгоритм на інтервальні нечіткі множини другого типу та реалізовано відповідні програмні компоненти.

Обґрунтованість запропонованих алгоритмічних рішень підтверджується проведеними обчислювальними експериментами. Зокрема, у роботі виконано порівняння різних варіантів кластеризації для контрольних наборів даних з кластерами різної щільності та об'єму. Для одного з досліджуваних наборів наведено порівняння алгоритму чітких с-середніх, FCM на основі IHMT2 та двох варіантів PCM на основі IHMT2 за значенням загального гіпероб'єму та помилкою кластеризації; найкращий із наведених варіантів PCM забезпечив нульову помилку кластеризації на відповідному контрольному наборі. Практична реалізованість одержаних результатів підтверджується створенням комплексу програмних модулів Clustering4Build. У роботі реалізовано модулі FuzzificationEngine, FCM-Core, PCM-Core, TypeReducer, GA-Optimizer, QualityEvaluator, ModelSelector, підсистему DSS, засоби зберігання даних у PostgreSQL та інтеграційний шлюз. Взаємодія між компонентами здійснюється через REST API із використанням структурованих даних у форматах JSON та JSONB, а параметри запусків та результати експериментів зберігаються централізовано, що забезпечує можливість їх повторного аналізу.

У цілому наукові положення дисертаційної роботи Бикова С.В. є логічно аргументованими, базуються на відповідному математичному, алгоритмічному та програмному інструментарії, мають достатній рівень теоретичного

обґрунтування, експериментальної перевірки та програмно-прикладної реалізації. Наявні обмеження експериментальної верифікації не заперечують працездатності запропонованих підходів, але визначають напрями їх подальшого дослідження та статистичного підтвердження.

4. Наукова новизна одержаних результатів.

Наукова новизна дисертаційної роботи Бикова С.В. полягає у розвитку математичного, алгоритмічного та інформаційно-технологічного забезпечення оцінювання технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності на основі методів кластеризації. Одержані результати реалізовано у складі інформаційної технології Clustering4Build, яка поєднує апарат нечітких множин першого типу та інтервальних нечітких множин другого типу, алгоритми FCM і PCM, генетичну оптимізацію параметрів, засоби оцінювання якості кластеризації та підтримки прийняття рішень.

До основних результатів, що характеризують наукову новизну дисертації, слід віднести удосконалення інформаційної технології Clustering4Build шляхом інтегрованого використання методів кластеризації на основі нечітких множин першого типу та інтервальних нечітких множин другого типу з генетичною оптимізацією параметрів. Запропонований підхід орієнтований на адаптивне групування об'єктів за умов різноманітності, неповноти та невизначеності вихідної інформації та дає можливість урахувати перехідний характер технічних станів конструкцій. Саме таке вдосконалення інформаційної технології визначено автором одним із положень наукової новизни.

Важливим результатом є поширення можливісного PCM-алгоритму на інтервальні нечіткі множини другого типу. У роботі запропоновано два варіанти формалізації невизначеності для PCM на основі ІНМТ2: через використання двох значень фаззифікатора та через два значення параметра «ширини зони» для кожного кластера. Це дозволяє формувати інтервальні функції типовості та враховувати невизначеність параметрів моделі при кластеризації об'єктів, що відрізняються за щільністю й об'ємом. У висновках дисертації цей результат

безпосередньо характеризується як поширення РСМ на ІНМТ2, що виходить за межі розглянутого автором підходу до FCM-кластеризації на основі ІНМТ2.

Науковий інтерес становить також розвиток комбінованих алгоритмічних підходів FCM+GA та РСМ+GA, у яких генетичний алгоритм використовується для автоматизованого підбору параметрів кластеризації. Для відповідних моделей передбачено оптимізацію фазифікаторів, параметрів «ширини зони» та інших параметрів кластеризаційного процесу. Це зменшує залежність результатів від ручного налаштування параметрів та забезпечує адаптацію моделей до конкретної структури вхідних даних. У дисертації перевага такого підходу порівняно з розглянутими відомими схемами пов'язується насамперед із заміною фіксованого експертного задавання параметрів їх автоматизованим еволюційним пошуком. Окремим результатом є розвиток засобів оцінювання якості кластеризації та автоматизованого вибору моделі.

Подальшого розвитку набули науково-методичні засади побудови інформаційних технологій оцінювання технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності. Їх розвиток полягає в інтегрованому використанні нечіткої та можливісної кластеризації, інтервального подання невизначеності, генетичної оптимізації параметрів, інструментальних вимірювань та експертних оцінок у межах єдиного інформаційного середовища. Такий підхід дозволяє враховувати не лише однозначно виражені технічні стани, а й ситуації невизначеності та перехідні області між окремими станами. Інформаційно-технологічним розвитком одержаних наукових результатів є їх реалізація у складі мікросервісної архітектури Clustering4Build.

Таким чином, положення наукової новизни дисертаційної роботи Бикова С.В. змістовно пов'язані з поставленою метою та завданнями дослідження і стосуються передусім розвитку методів кластеризації в умовах невизначеності, поширення РСМ на інтервальні нечіткі множини другого типу, генетичної оптимізації параметрів моделей, формалізованого вибору алгоритму кластеризації та інтеграції розробленого математичного й алгоритмічного забезпечення в інформаційну технологію Clustering4Build.

5. Теоретичне та практичне значення результатів.

Теоретичне значення одержаних результатів полягає у розвитку науково-методичних засад створення інформаційних технологій оцінювання технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності. Запропоновані положення розширюють можливості застосування методів кластерного аналізу в інформаційних системах технічного моніторингу завдяки поєднанню нечітких множин першого типу та інтервальних нечітких множин другого типу, алгоритмів нечіткої кластеризації FCM і можливісної кластеризації PCM, процедур зниження типу та генетичної оптимізації параметрів.

Теоретичну цінність має формалізація технічних станів будівельних конструкцій в умовах нечітких меж між окремими категоріями стану. Застосування FCM дозволяє характеризувати об'єкт ступенями приналежності до кластерів, тоді як PCM використовує ступені типовості та є менш залежним від умови нормування приналежностей. Використання інтервальних нечітких множин другого типу додатково дає змогу враховувати невизначеність самої функції приналежності через інтервальне представлення її меж.

Важливе теоретичне значення має поширення PCM-алгоритму на інтервальні нечіткі множини другого типу. У роботі розглянуто два способи формалізації невизначеності — через два значення фаззифікатора та через два значення параметра «ширини зони» для кожного кластера. Такий підхід розширює можливості моделювання множин об'єктів, що характеризуються різною щільністю та об'ємом, і дозволяє адаптувати процедуру кластеризації до структурних особливостей вхідних даних.

Теоретичне значення мають також запропоновані підходи до оцінювання якості кластеризації за показниками загального гіпероб'єму та індексу сферичності, а також методика вибору між FCM- і PCM-моделями на основі нечітких множин першого типу та інтервальних нечітких множин другого типу залежно від структурних характеристик даних. Це створює основу для адаптивного вибору моделі кластеризації в системах технічного моніторингу.

Практичне значення результатів дисертації полягає у програмній реалізації розроблених математичних та алгоритмічних засобів у складі інформаційної технології Clustering4Build. Створений програмний комплекс забезпечує підготовку і фазифікацію вхідних даних, виконання FCM- та PCM-кластеризації на основі НМТ1 та ІНМТ2, процедуру зниження типу, генетичну оптимізацію параметрів, оцінювання якості кластеризації, автоматизований вибір моделі, візуалізацію результатів та їх передавання до підсистеми підтримки прийняття рішень. Практична цінність модуля GA-Optimizer полягає в автоматизації пошуку параметрів кластеризаційних моделей та зменшенні залежності від їх ручного налаштування. Важливим практичним результатом є реалізація Clustering4Build на основі мікросервісної архітектури. Взаємодія програмних компонентів здійснюється через REST API із передаванням структурованих даних у форматі JSON, а централізоване збереження вхідних наборів, параметрів запусків, результатів кластеризації та показників якості реалізовано в СУБД PostgreSQL із використанням JSONB. Це забезпечує можливість повторного використання конфігурацій, відтворення обчислювальних експериментів та аудиту отриманих результатів.

Практично значущою є передбачена архітектурою можливість інтеграції інформаційної технології з BIM-моделями, IoT-потокami даних і системою підтримки прийняття рішень. Це дозволяє використовувати Clustering4Build як складову інформаційного середовища технічного моніторингу, в якому результати інструментальних вимірювань та експертного оцінювання можуть проходити послідовні етапи валідації, нормалізації, фазифікації, кластеризації, оцінювання якості та формування рекомендацій.

Таким чином, теоретичне значення результатів дисертації Бикова С.В. полягає у розвитку математичного, алгоритмічного та інформаційно-технологічного забезпечення кластерного оцінювання технічного стану будівельних об'єктів в умовах невизначеності, а практичне – у програмній реалізації відповідних методів у складі інтегрованої інформаційної технології

Clustering4Build, придатної для використання в системах технічного моніторингу та підтримки прийняття інженерних рішень.

6. Повнота викладення результатів та оцінка рівня апробації.

Основні наукові положення, методичні розробки та практичні результати дисертаційної роботи Бикова С.В. достатньо повно відображені в опублікованих наукових працях здобувача. Тематика публікацій охоплює інформаційні методи діагностування промислових будівель, моделі прогнозування надійності прийняття рішень у системах діагностики технічного стану, механізми забезпечення експлуатаційної безпеки будівель, аналітичні й діагностичні блоки контролю у цифровому середовищі, методи визначення деформацій будівельних конструкцій та інформаційні технології управління життєвим циклом будівель і споруд. Така тематична спрямованість публікацій узгоджується із завданнями дисертації та відображає послідовне формування її теоретичних, алгоритмічних і прикладних результатів.

У переліку праць за темою дисертації наведено статті, опубліковані у наукових фахових виданнях України категорії «Б», закордонних періодичних виданнях, прирівняних до фахових, а також праці апробаційного характеру. Зокрема, результати дослідження представлено у виданнях «Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини», «Шляхи підвищення ефективності будівництва», «Управління розвитком складних систем» та Modern Engineering and Innovative Technologies. Це засвідчує представлення результатів у виданнях, проблематика яких охоплює інформаційні технології, складні системи, технічну діагностику та експлуатаційну безпеку будівельних об'єктів. Рівень апробації результатів слід оцінити позитивно. Ключові положення та висновки дисертаційної роботи були представлені на п'яти всеукраїнських і міжнародних науково-практичних конференціях. У дисертації наведено праці апробаційного характеру, підготовлені за матеріалами конференцій, що відбувалися у Карлсруе, Лондоні, Сінгапурі, Торонто та Сіетлі у 2024–2025 роках. Тематика доповідей стосувалася методів діагностування деформацій будівельних конструкцій, інтегрованої оцінки надійності рішень, інформаційного управління життєвим

циклом конструкцій і споруд, моделювання загроз безпеці та створення відповідних інформаційних моделей.

Представлення результатів на наукових конференціях забезпечило їх обговорення в професійному середовищі та дало змогу зіставити запропоновані підходи з актуальними напрямками розвитку інформаційних технологій технічного моніторингу. Заявлена в роботі апробація підтверджує, що результати не залишилися виключно на рівні теоретичної розробки, а пройшли відповідне наукове обговорення. У дисертації також зазначено, що результати апробації підтвердили підвищення точності класифікації, стабільності збіжності алгоритмів і відтворюваності результатів за наявності шумових та неповних даних. Окремо слід відзначити, що практичне спрямування результатів підтверджене довідками про їх впровадження у діяльність ТОВ «Марстон-Груп», ТОВ «Альфа-Сервіс» та Інституту місцевого розвитку. Зазначені матеріали підтверджують можливість використання запропонованої інформаційної технології для автоматизації оброблення результатів інструментальних вимірювань, скорочення часу експертного аналізу та підвищення достовірності висновків щодо фактичного технічного стану будівель і споруд.

У цілому зміст наукових праць відповідає основним положенням дисертації, а кількість і географія конференцій свідчать про належний рівень апробації. Результати дослідження достатньо повно представлені в публікаціях, пройшли наукове обговорення та мають підтверджене практичне застосування.

7. Оцінка змісту та структури дисертації.

Дисертаційна робота Бикова С.В. є завершеним, логічно структурованим дослідженням, побудова якого визначається послідовністю розв'язання поставлених наукових завдань. Робота містить анотації українською та англійською мовами, список опублікованих праць здобувача, зміст, вступ, чотири розділи основної частини, висновки до кожного розділу, загальні висновки, список використаних джерел і додатки. У вступі належним чином обґрунтовано актуальність обраної теми, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, розкрито використані методи, наукову новизну, практичне

значення, особистий внесок здобувача, відомості про апробацію та публікації. Сформульовані завдання відповідають загальній меті розроблення інформаційної технології оцінювання технічного стану об'єктів будівництва.

Перший розділ «Огляд і аналіз підходів до вирішення задачі оцінки і класифікації технічного стану об'єктів будівництва в інформаційних технологіях» має аналітико-постановочний характер. У ньому розглянуто особливості оцінювання технічного стану як інформаційної проблеми, систематизовано джерела та види невизначеності, проаналізовано методи інтелектуальної обробки даних і кластеризації, нечіткі та інтервальні моделі представлення знань, а також сучасні програмні й інформаційні системи технічного моніторингу. Завершення розділу постановкою науково-прикладного завдання та визначенням вимог до майбутньої інформаційної технології забезпечує логічний перехід до методичної частини дослідження.

У другому розділі сформовано науково-методичне та алгоритмічне підґрунтя інформаційної технології Clustering4Build. Основну увагу приділено комбінованим методам FCM+GA і PCM+GA, адаптивному визначенню центрів кластерів, ступенів приналежності та параметрів фазифікації в умовах шумових, неповних і неоднорідних даних. Розглянуто взаємодію модулів фазифікації, аналітичного ядра, генетичної оптимізації та системи підтримки прийняття рішень. Цей розділ формує математичну й алгоритмічну основу подальшої програмної реалізації.

Третій розділ присвячено розвитку моделей кластеризації на основі нечітких множин першого та інтервальних нечітких множин другого типу. Обґрунтовано використання FCM- і PCM-алгоритмів, розроблено модулі FuzzificationEngine та FCM-Core, визначено показники якості кластеризації, серед яких гіпероб'єм та індекс сферичності, а також запропоновано методику вибору між моделями НМТ1 та ІНМТ2.

Четвертий розділ має виразне програмно-прикладне спрямування. У ньому розглянуто розроблення та дослідження модулів Clustering4Build, обґрунтовано мікросервісну архітектуру з REST-взаємодією, реалізовано централізоване

збереження даних у PostgreSQL у форматі JSONB, підтримку кластеризації на основі HMT1 та IHMT2, процедури зниження типу, інтеграцію генетичної оптимізації та DSS. Важливим результатом є побудова замкненого циклу «оптимізація – аналіз – рекомендація – візуалізація», а також можливість взаємодії технології з BIM-моделями та IoT-потоками.

Загальні висновки узгоджуються зі змістом розділів, відображають результати розв’язання поставлених завдань і розкривають наукове та практичне значення створеної інформаційної технології. Додатки доповнюють основний текст матеріалами, пов’язаними з програмною реалізацією, результатами досліджень та підтвердженням практичного використання розробок. Послідовність викладення матеріалу є загалом вдалою: від аналізу проблемної області та формулювання вимог автор переходить до розроблення математичних моделей і алгоритмів, після чого здійснює їх програмну реалізацію та експериментальну перевірку. Розділи взаємопов’язані, висновки до них відображають основні проміжні результати, а загальна структура відповідає логіці завершеного науково-прикладного дослідження.

Значна кількість графічного матеріалу місцями зумовлює надмірну деталізацію викладу та повторення окремих архітектурних і алгоритмічних рішень у різних частинах роботи. Частину близьких за змістом схем доцільно було б укрупнити або об’єднати, що підвищило б компактність основного тексту без втрати його змістовності. Це зауваження має редакційний характер і не знижує загальної позитивної оцінки структури та змісту дисертації.

Отже, дисертаційна робота Бикова С.В. характеризується цілісністю, логічною завершеністю та послідовним викладенням результатів. Її структура забезпечує повне розкриття мети й завдань дослідження, а співвідношення теоретичної, алгоритмічної, програмної та експериментальної складових є загалом обґрунтованим.

8. Зауваження та дискусійні питання.

Загалом дисертаційна робота Бикова С.В. виконана на належному науковому рівні, має логічно завершений характер і містить обґрунтовані

теоретичні, алгоритмічні та програмно-прикладні результати. Водночас окремі положення потребують додаткового уточнення.

1. У підрозділі 1.6 автором виконано порівняння сучасних BIM-, SHM-, DSS- та AI/ML-рішень за призначенням, типами даних, аналітичними можливостями, роботою з невизначеністю, наявністю кластеризації та основними обмеженнями. Сам автор обґрунтовує доцільність застосування мікросервісного підходу, зокрема можливістю незалежного розвитку та масштабування аналітичних компонентів. Водночас у самій порівняльній таблиці архітектурні характеристики систем майже не розглядаються. Тому доцільно було б розширити систему критеріїв такими характеристиками, як способи інтеграції даних, наявність програмних інтерфейсів, інтероперабельність, масштабованість, можливість незалежного розгортання аналітичних компонентів та підтримка потокових даних. Це дозволило б більш аргументовано показати саме інформаційно-архітектурні переваги Clustering4Build порівняно з розглянутими класами систем.

2. У таблиці 3.2 наведено кількісне порівняння алгоритму чітких середніх, FCM на основі IHMT2 та двох варіантів РСМ на основі IHMT2 за значенням загального гіпероб'єму N і помилкою кластеризації. Для відповідного контрольного набору найменше значення $N=255,635142$ та нульову помилку одержано для РСМ на основі IHMT2 з довільними значеннями фазифікаторів. Разом із тим у дисертації відсутнє єдине узагальнене експериментальне порівняння всіх ключових варіантів, що досліджуються в роботі, зокрема FCM і РСМ на основі HMT1 та IHMT2, а також їх комбінацій із генетичною оптимізацією, на декількох наборах даних за однаковими критеріями. Слід зазначити, що окремі порівняння продуктивності FCM, GA та FCM+GA автором наведено. Проте зведений експеримент за єдиним протоколом зробив би висновки щодо відносних переваг запропонованих алгоритмів більш переконливими.

3. Окремого пояснення потребує узгодження висновків щодо відтворюваності результатів генетичної оптимізації. Автор прямо зазначає, що

наведені результати отримано для одного запуску генетичного алгоритму на кожен контрольний набір даних, без усереднення за багатьма реалізаціями та без оцінювання статистичної значущості, а для остаточного підтвердження переваг рекомендує не менше 10–30 повторних запусків із визначенням середнього значення та довірчого інтервалу. Водночас зазначається, що дослідження стійкості результатів до розміру популяції, ймовірностей схрещування і мутації та кількості поколінь підтвердило відтворюваність розв’язків, причому варіювання параметрів ГА не змінювало якісної структури кластерів. Доцільно чіткіше пояснити, на яких саме експериментах ґрунтується останній висновок: навести кількість незалежних запусків, спосіб фіксації або варіювання випадкової ініціалізації та статистичні характеристики отриманих результатів.

4. У четвертому розділі наведено важливі кількісні результати практичного впровадження Clustering4Build. За актами впровадження зазначено підвищення достовірності класифікації технічного стану конструкцій у середньому на 17–18,5 %, скорочення тривалості аналітичного оброблення результатів моніторингу на 21–22 % та зменшення кількості повторних експертних оцінок приблизно на 16 %. Водночас у тексті роботи доцільно було б детальніше представити методику отримання цих показників: кількість та типи об’єктів, обсяг спостережень, базовий підхід, відносно якого визначалося покращення, формальне визначення показника «достовірність класифікації», порядок формування експертного еталона, а також варіативність одержаних результатів. Це істотно посилює доказовість заявленого практичного ефекту.

5. У роботі при уніфікації різномірних будівельних об’єктів запропоновано формувати єдиний повний перелік елементів моніторингу, а елементи, структурно відсутні у конкретному типі об’єкта, розглядати як умовні та приймати значення відповідних показників рівними нулю. Такий спосіб забезпечує однакову розмірність векторів ознак, однак потребує додаткового математичного обґрунтування, оскільки нуль може бути інтерпретований алгоритмом як фактичне значення ознаки та впливати на обчислення відстаней, положення центрів кластерів і результати групування. Доцільним було б

дослідити чутливість результатів до такого способу кодування та порівняти його, наприклад, із маскуванням структурно відсутніх ознак або модифікованими правилами обчислення відстаней.

6. Запропоновані в роботі показники якості кластеризації H та Sph і їх використання у модулях `QualityEvaluator` та `ModelSelector` є важливою складовою інформаційної технології. `ModelSelector` здійснює автоматизований порівняльний аналіз результатів FCM2 та PCM2 за показниками, розрахованими `QualityEvaluator`. Крім того, у роботі зазначено, що автоматичний вибір між H та Sph пов'язується з аналізом спектра власних значень коваріаційних матриць. Водночас доцільно було б більш повно експериментально перевірити стійкість цього механізму на наборах даних із різною формою, щільністю, об'ємом, кількістю кластерів і рівнем невизначеності, а також кількісно оцінити, наскільки автоматизований вибір моделі покращує кінцевий результат порівняно з використанням наперед фіксованої моделі.

7. У дисертації наведено окремі кількісні оцінки обчислювальної ефективності алгоритмів. Зокрема, у другому розділі порівнюються кількість ітерацій та час виконання FCM, GA і FCM+GA, а в інших експериментах також наведено час кластеризації для різних конфігурацій. Разом із тим на рівні всієї мікросервісної інформаційної технології кількісного дослідження фактично не представлено. У четвертому розділі автор зазначає, що під час дослідної експлуатації система зберігала стійку роботу за «прийнятної затримки відгуку», а кількісні межі пропускну здатності залежать від ресурсів розгортання. З огляду на заявлену можливість роботи з потоковими даними та функціонування в реальному часі, доцільно було б навести результати системного навантажувального тестування: латентність повного конвеєра, пропускну здатність REST-взаємодії, час роботи GA-Optimizer та кластеризаційних модулів залежно від кількості об'єктів і ознак, а також ефект горизонтального масштабування при паралельному надходженні даних.

8. У четвертому розділі достатньо детально описано контроль якості вхідних даних, параметри запусків і механізми збереження результатів. Зокрема,

FuzzificationEngine перевіряє повноту, діапазони, типи, пропуски та аномалії, а протоколи валідації і параметри нормалізації зберігаються в PostgreSQL. Для запусків FCM та генетичної оптимізації також зберігаються параметри, метадані, конфігурації популяцій і найкращі знайдені рішення; API Gateway дозволяє відстежувати стан виконання конвеєра. Водночас менш детально розкрито поведінку мікросервісної системи саме в умовах відмов окремих компонентів: механізми повторного виконання та ідемпотентності запитів, відновлення перерваних обчислень, забезпечення узгодженості даних у разі часткової відмови сервісів, а також версіонування програмних компонентів і моделей. Деталізація цих механізмів посилює обґрунтування експлуатаційної надійності Clustering4Build.

Наведені зауваження мають уточнювальний характер, не заперечують наукової новизни та достовірності основних результатів і не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи Бикова С.В.

Загальний висновок офіційного опонента.

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 самостійним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-прикладне завдання, пов'язане з розвитком інформаційної технології оцінювання технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності на основі методів кластеризації, інтервальних нечітких множин другого типу та генетичної оптимізації параметрів.

Актуальність теми дисертації зумовлена потребою сучасних систем технічного моніторингу будівель і споруд у методах та інформаційних технологіях, здатних опрацьовувати неоднорідні, неповні та невизначені дані, результати інструментальних вимірювань і експертного оцінювання, а також забезпечувати інформаційну підтримку прийняття інженерних рішень.

Запропоновані автором підходи відповідають сучасним тенденціям розвитку інформаційних систем технічного моніторингу, цифровізації будівельної галузі та застосування інтелектуальних методів аналізу даних.

Мета, завдання, об'єкт і предмет дослідження є взаємоузгодженими. Структура дисертаційної роботи логічно відповідає поставленим завданням і відображає послідовність переходу від аналізу існуючих підходів до розроблення математичного та алгоритмічного забезпечення, його програмної реалізації й експериментальної перевірки. Наукові положення, висновки та рекомендації мають належний рівень обґрунтованості, базуються на використанні апарату нечітких множин першого типу та інтервальних нечітких множин другого типу, алгоритмів нечіткої кластеризації FCM і можливісної кластеризації PCM, генетичних алгоритмів оптимізації та сучасних засобів програмної інженерії.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вдосконаленні інформаційної технології Clustering4Build, поширенні PCM-алгоритму на інтервальні нечіткі множини другого типу, розвитку комбінованих підходів FCM+GA та PCM+GA, а також розвитку засобів формалізованого оцінювання якості кластеризації та автоматизованого вибору моделі на основі характеристик сформованих кластерів. Розроблені математичні та алгоритмічні засоби програмно реалізовано у складі мікросервісної інформаційної технології Clustering4Build, що включає спеціалізовані модулі кластеризації, генетичної оптимізації, зниження типу, оцінювання якості та підтримки прийняття рішень.

Практичне значення дисертаційної роботи визначається реалізацією розроблених методів та алгоритмів у вигляді функціонуючого програмного комплексу з REST-взаємодією між компонентами, централізованим зберіганням даних і результатів у PostgreSQL та можливістю інтеграції з BIM-моделями, IoT-потокami даних і системою підтримки прийняття рішень. Практична придатність розроблених рішень підтверджується результатами апробації на даних технічного моніторингу та наявністю документально підтвердженого впровадження результатів дослідження. У дисертації наведено кількісні

показники ефективності впровадження, пов'язані з підвищенням достовірності класифікації технічного стану, скороченням тривалості аналітичного оброблення даних та зменшенням кількості експертних оцінок.

Зауваження, наведені у цьому відгуку, стосуються окремих аспектів повноти експериментальної верифікації запропонованих алгоритмів, статистичного підтвердження результатів генетичної оптимізації, обґрунтування способів подання структурно відсутніх даних, методики визначення кількісних показників практичної ефективності, а також характеристик продуктивності та відмовостійкості програмної реалізації. Вони мають дискусійний та рекомендаційний характер, визначають можливі напрями подальшого розвитку дослідження і не змінюють загальної позитивної оцінки одержаних у дисертації результатів.

Вважаю, що дисертаційна робота Бикова Сергія Володимировича «Інформаційна технологія оцінки технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності із застосуванням методики кластеризації» є завершеним самостійним науковим дослідженням, виконаним на високому науковому та методичному рівні, а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 - Інформаційні системи та технології.

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

д.т.н, професор, професор кафедри
біомедичної кібернетики Національного
технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Олександр КУЧАНСЬКИЙ