

АНОТАЦІЯ

Биков С.В. Інформаційна технологія оцінки технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності із застосуванням методики кластеризації. - *Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 - «Інформаційні системи та технології». Київський національний університет будівництва і архітектури. Київ, 2026.

Роботу присвячено розробленню інформаційної технології оцінювання технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності на основі застосування методів кластеризації. У межах дослідження передбачено формування відповідного математичного апарату та розроблення алгоритмічного забезпечення кластерного аналізу з використанням нечітких множин першого і другого типів та генетичних алгоритмів оптимізації. Запропонована технологія орієнтована на практичну реалізацію з можливістю інтеграції до сучасних інформаційних систем моніторингу технічного стану будівель і споруд.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у науковому обґрунтуванні інформаційної технології Clustering4Build, що інтегрує ІНМТ2, нечіткі множини та еволюційні алгоритми для класифікації технічного стану об'єктів в умовах невизначеності. Розроблено GA-Optimizer і TypeReducer для автоматизованої оптимізації параметрів та підвищення стійкості кластеризації, а також QualityEvaluator для обґрунтованого вибору оптимальних моделей. Інтеграція з DSS і мікросервісною архітектурою забезпечує масштабованість, прозорість рішень і зростання точності технічного моніторингу будівель.

В дисертаційній роботі **удосконалено:**

- інформаційну технологію Clustering4Build для оцінки технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності, яка інтегрує методи кластеризації на основі нечітких множин першого та другого типів з

генетичною оптимізацією параметрів. Забезпечено адаптивне групування об'єктів із урахуванням перехідних станів і різноманітності даних.

- розширення множини об'єктів кластеризації до IHMT2 для PCM-алгоритму, що дозволяє враховувати невизначеність фазифікатора та «ширини зони» для кожного кластера. Реалізація в Clustering4Build через мікросервіси FuzzificationEngine і TypeReducer забезпечує обчислення інтервальних функцій типовості та центрів кластерів із збереженням даних у JSONB для DSS. Інноваційність полягає в інтеграції автоматизованого підбору параметрів PCM-алгоритму за допомогою GA-Optimizer та оцінки якості кластеризації через QualityEvaluator для точного технічного моніторингу.

- застосування комбінованих алгоритмів FCM+GA та PCM+GA до задачі кластеризації технічного стану об'єктів будівництва, у яких на основі відомих підходів до еволюційного кодування параметрів нечіткої кластеризації реалізовано автоматизоване визначення центрів кластерів, параметрів фазифікації та ступенів приналежності, адаптоване до специфіки шумових і неповних даних технічного моніторингу, що сприяє підвищенню точності, збіжності та обчислювальної ефективності оцінювання технічного стану;

- науково-прикладну реалізацію мікросервісної архітектури з REST-взаємодією для централізованого збереження результатів та інтеграції з DSS, BIM і IoT-потокami, що забезпечує масштабованість, модульність, відтворюваність обчислювальних експериментів та практичну підтримку прийняття рішень інженерами.

Набули подальшого розвитку:

- науково-методичні засади побудови інформаційної технології оцінки технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності, що, на відміну від існуючих BIM-, SHM- та DSS-рішень, базуються на інтегрованому використанні методів нечіткої кластеризації, апарату нечітких множин першого і другого типів та інтервальних моделей подання знань.

Запропонований підхід забезпечує формалізацію перехідних станів конструкцій, поєднання інструментальних вимірювань і експертних оцінок, а також адаптивну обробку різнорідних і неповних даних моніторингу. Це створює теоретичне підґрунтя для розроблення універсального програмного інструментарію кластерного аналізу технічного стану в межах спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»;

- комбіновані методи інтелектуальної кластеризації FCM+GA та PCM+GA в складі інтегрованої інформаційної технології Clustering4Build, які передбачають генетичну оптимізацію центрів кластерів, параметрів фазифікації та ступенів приналежності з кодуванням хромосом відповідними ваговими коефіцієнтами. На відміну від існуючих підходів, запропонована архітектура реалізує замкнений цикл «оптимізація – аналіз – рекомендація – візуалізація», інтегрується з PostgreSQL, BIM-моделями та IoT-потокami даних і забезпечує підвищення швидкодії, стійкості збіжності та точності оцінювання технічного стану будівельних об'єктів.

Основний зміст дисертаційної роботи. Дисертаційну роботу присвячено вирішенню науково-прикладного завдання підвищення достовірності та автоматизації оцінки технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності шляхом розроблення інтегрованої інформаційної технології кластерного аналізу. У межах дослідження обґрунтовано перехід від фрагментарного аналізу показників до функціонування комплексних систем технічного моніторингу з використанням нечітких та інтервальних моделей подання знань. Розроблено методи кластеризації на основі нечітких множин першого і другого типів у поєднанні з генетичними алгоритмами оптимізації, що забезпечують адаптивне визначення параметрів моделей в умовах шумових, неповних і неоднорідних даних. Створено мікросервісну архітектуру Clustering4Build із реалізацією замкненого циклу «оптимізація – аналіз – рекомендація – візуалізація» та інтеграцією з BIM-моделями, IoT-потокami і базою даних PostgreSQL. Запропонована технологія забезпечує підвищення точності, швидкодії та відтворюваності обчислювальних

експериментів, формування обґрунтованих рекомендацій у межах DSS та створює надійну основу для автоматизованого моніторингу і прогнозування технічного стану будівель у реальному часі.

За результатами дослідження розроблено:

1. Розроблено інтегровану інформаційну технологію Clustering4Build для оцінки технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності, що поєднує інтервальні нечіткі множини другого типу, алгоритми FCM і PCM та генетичну оптимізацію параметрів у єдиному адаптивному середовищі. Створено програмні модулі GA-Optimizer, TypeReducer і QualityEvaluator, які забезпечують автоматизоване налаштування фазифікаторів, центрів кластерів і параметрів «ширини зони», а також обґрунтований вибір моделей за показниками якості кластеризації. Апробація підтвердила підвищення точності, стійкості збіжності та відтворюваності результатів у задачах технічного моніторингу за наявності шумових і неповних даних.

2. Обґрунтовано мікросервісну архітектуру інформаційного середовища технічного моніторингу з REST-взаємодією, що забезпечує модульність, масштабованість та інтеграцію з DSS, BIM-моделями, IoT-потокami і базою даних PostgreSQL (JSONB). Реалізовано замкнений цикл «оптимізація – аналіз – рекомендація – візуалізація», який підтримує автоматизовану кластеризацію та формування інженерних рішень у реальному часі. Запропонована структура гарантує прозорість обчислювальних експериментів, аудит результатів і практичну підтримку прийняття рішень щодо безпечної експлуатації будівельних об'єктів.

У **першому розділі** сформовано концептуально-теоретичну базу оцінки технічного стану об'єктів будівництва в умовах невизначеності. Обґрунтовано доцільність використання нечітких та інтервальних моделей для формалізації знань у системах технічного моніторингу. Показано, що нечітка кластеризація дозволяє враховувати перехідні стани конструкцій, різноманітність і неповноту вхідних даних. Поєднання інструментальних

вимірювань з експертними оцінками забезпечує комплексний аналіз стану об'єктів. Проаналізовано сучасні BIM-, SHM- та DSS-рішення та виявлено обмеженість їх аналітичних можливостей щодо адаптивної кластеризації. Встановлено відсутність універсального програмного інструментарію для інтеграції різномірних даних моніторингу. Визначено необхідність створення інтегрованої інформаційної технології з поєднанням нечітких множин, кластерного аналізу та засобів візуалізації результатів. Розділ закладає теоретичне підґрунтя для розробки адаптивної та масштабованої системи оцінки технічного стану будівель.

Другий розділ присвячено формуванню науково-методичного підґрунтя та розробці комбінованих методів кластеризації FCM+GA та PCM+GA для оцінки технічного стану об'єктів будівництва. Розроблено алгоритми адаптивного визначення центрів кластерів, ступенів приналежності та параметрів фазифікації в умовах шумових, неповних та неоднорідних даних. Створено модулі фазифікації, аналітичного ядра, оптимізації та DSS, інтегровані з BIM-моделями, IoT-потокami та базою PostgreSQL. Інноваційність полягає у поєднанні нечіткої логіки, генетичної оптимізації та кодування хромосом ступенями приналежності. Розроблена архітектура Clustering4Build реалізує замкнений цикл «оптимізація → аналіз → рекомендація → візуалізація». Це забезпечує підвищення стабільності, швидкодії та точності кластеризації. Запропоновані методи інтегрують математичну ефективність, інформаційні технології та практичну адаптивність. Розділ встановлює основу для автоматизованого та надійного прогнозування технічного стану будівель.

У **третьому розділі** обґрунтовано застосування FCM та PCM-алгоритмів з IHMT2 для оцінки технічного стану будівель у умовах невизначеності. Розроблено модулі FuzzificationEngine та FCM-Core для автоматичного формування інтервальних функцій приналежності. Визначено показники якості кластеризації, такі як гіпероб'єм та індекс сферичності, для вибору оптимальної моделі. Застосовано генетичні алгоритми для оптимізації

фазифікаторів і параметрів «ширини зони», що підвищує точність і відтворюваність кластеризації. Розширено множину об'єктів РСМ-алгоритму для врахування різної щільності та об'єму даних. Запропоновано методику вибору між НМТ1 та ІНМТ2 на основі аналізу структурної варіативності даних. Інтеграція алгоритмів з мікросервісною архітектурою забезпечує автоматизацію та надійність технічного моніторингу. Наведено приклади класифікації об'єктів із різною щільністю та об'ємом для демонстрації ефективності підходу.

Четвертий розділ присвячено розробці та дослідженню модулів інформаційної технології Clustering4Build для автоматизованої оцінки технічного стану будівель. Запропоновано мікросервісну архітектуру з REST-взаємодією, що забезпечує модульність, масштабованість і технологічну незалежність компонентів. Реалізовано підтримку кластеризації на основі НМТ1 та ІНМТ2 із процедурою зниження типу. Запроваджено централізоване збереження результатів у PostgreSQL (JSONB), що гарантує відтворюваність і аудит обчислювальних експериментів. Інтеграція генетичної оптимізації та DSS дозволяє адаптивно налаштовувати моделі та формувати практичні рекомендації. Створено комплекс пакетів прикладних програм для реального часу, що забезпечує надійний та точний моніторинг будівель. Запропоновані рішення інтегруються з BIM, IoT та DSS, підвищуючи інтелектуальність системи. Розділ демонструє практичну реалізацію комплексного, автоматизованого та адаптивного технічного моніторингу об'єктів будівництва.

Ключові слова: оцінка технічного стану будівель засобами інформаційної технології Clustering4Build, автоматизований моніторинг, нечіткі множини, інтервальні моделі, кластерний аналіз, генетична оптимізація, адаптивні моделі, комбіновані алгоритми FCM+GA та РСМ+GA, мікросервісна архітектура, цифрові дані, інтеграція з BIM та IoT.

ABSTRACT

Bykov S.V. Information technology for assessing the technical condition of construction objects under conditions of uncertainty using the clustering method. - *Qualification scientific work in the form of a manuscript.*

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 126 – “Information Systems and Technologies”. Kyiv National University of Construction and Architecture. Kyiv, 2026.

The work is devoted to the development of information technology for assessing the technical condition of construction objects under conditions of uncertainty based on the use of clustering methods. The research provides for the formation of an appropriate mathematical apparatus and the development of algorithmic support for cluster analysis using fuzzy sets of the first and second types and genetic optimization algorithms. The proposed technology is focused on practical implementation with the possibility of integration into modern information systems for monitoring the technical condition of buildings and structures.

Scientific novelty of the results obtained. The scientific novelty of the dissertation work lies in the scientific substantiation of the Clustering4Build information technology, which integrates INMT2, fuzzy sets and evolutionary algorithms for classifying the technical condition of objects under conditions of uncertainty. GA-Optimizer and TypeReducer have been developed for automated optimization of parameters and increasing the stability of clustering, as well as QualityEvaluator for a reasoned selection of optimal models. Integration with DSS and microservice architecture provides scalability, transparency of solutions and increased accuracy of technical monitoring of buildings.

The dissertation work has improved:

- Clustering4Build information technology for assessing the technical condition of construction objects under conditions of uncertainty, which integrates clustering methods based on fuzzy sets of the first and second types with genetic

optimization of parameters. Adaptive grouping of objects is provided, taking into account transient states and data heterogeneity.

- expansion of the set of clustering objects to INMT2 for the PCM algorithm, which allows taking into account the uncertainty of the fuzzifier and the "zone width" for each cluster. Implementation in Clustering4Build through the FuzzificationEngine and TypeReducer microservices provides calculation of interval typicality functions and cluster centers with data storage in JSONB for DSS. Innovation lies in the integration of automated selection of PCM algorithm parameters using GA-Optimizer and clustering quality assessment using QualityEvaluator for accurate technical monitoring

- combined algorithms FCM+GA and PCM+GA with automated determination of cluster centers, degrees of membership and fuzzification parameters, which increases the accuracy, stability and speed of technical condition assessment in conditions of noisy, incomplete and heterogeneous data.

- scientific and applied implementation of microservice architecture with REST interaction for centralized storage of results and integration with DSS, BIM and IoT flows, which ensures scalability, modularity, reproducibility of computational experiments and practical support for decision-making by engineers.

Further development has been made:

- scientific and methodological principles for building information technology for assessing the technical condition of construction objects under conditions of uncertainty, which, unlike existing BIM, SHM and DSS solutions, are based on the integrated use of fuzzy clustering methods, the apparatus of fuzzy sets of the first and second types and interval models of knowledge representation. The proposed approach provides formalization of transient states of structures, combination of instrumental measurements and expert assessments, as well as adaptive processing of heterogeneous and incomplete monitoring data. This creates a theoretical basis for the development of a universal software toolkit for cluster analysis of technical condition within the scope of specialty 126 "Information Systems and Technologies";

- combined methods of intelligent clustering FCM+GA and PCM+GA as part of the integrated information technology Clustering4Build, which provide for genetic optimization of cluster centers, fuzzification parameters and degrees of membership with chromosome encoding by appropriate weight coefficients. Unlike existing approaches, the proposed architecture implements a closed loop "optimization - analysis - recommendation - visualization", integrates with PostgreSQL, BIM models and IoT data streams and provides increased speed, stability of convergence and accuracy of assessing the technical condition of construction objects.

The main content of the dissertation work. The dissertation work is devoted to solving the scientific and applied problem of increasing the reliability and automation of assessing the technical condition of construction objects under conditions of uncertainty by developing an integrated information technology of cluster analysis. The study substantiates the transition from fragmentary analysis of indicators to the functioning of complex technical monitoring systems using fuzzy and interval knowledge representation models. Clustering methods based on fuzzy sets of the first and second types in combination with genetic optimization algorithms have been developed, which provide adaptive determination of model parameters in conditions of noisy, incomplete and heterogeneous data. The Clustering4Build microservice architecture has been created with the implementation of a closed loop "optimization - analysis - recommendation - visualization" and integration with BIM models, IoT streams and the PostgreSQL database. The proposed technology provides increased accuracy, speed and reproducibility of computational experiments, the formation of substantiated recommendations within the DSS and creates a reliable basis for automated monitoring and forecasting of the technical condition of buildings in real time.

According to the results of the study, the following was developed:

1. An integrated information technology Clustering4Build was developed to assess the technical condition of construction objects under uncertainty, which combines interval fuzzy sets of the second type, FCM and PCM algorithms and

genetic optimization of parameters in a single adaptive environment. The GA-Optimizer, TypeReducer and QualityEvaluator software modules were created, which provide automated tuning of fuzzifiers, cluster centers and "zone width" parameters, as well as a reasoned selection of models based on clustering quality indicators. The testing confirmed the increase in accuracy, stability of convergence and reproducibility of results in technical monitoring tasks in the presence of noisy and incomplete data.

2. The microservice architecture of the technical monitoring information environment with REST interaction is substantiated, which provides modularity, scalability and integration with DSS, BIM models, IoT streams and the PostgreSQL database (JSONB). A closed loop "optimization - analysis - recommendation - visualization" is implemented, which supports automated clustering and the formation of engineering solutions in real time. The proposed structure guarantees the transparency of computational experiments, audit of results and practical support for decision-making regarding the safe operation of construction objects.

In the first section, a conceptual and theoretical basis for assessing the technical condition of construction objects under uncertainty is formed. The feasibility of using fuzzy and interval models for formalizing knowledge in technical monitoring systems is substantiated. It is shown that fuzzy clustering allows taking into account transient states of structures, heterogeneity and incompleteness of input data. The combination of instrumental measurements with expert assessments provides a comprehensive analysis of the condition of objects. Modern BIM, SHM and DSS solutions are analyzed and their analytical capabilities regarding adaptive clustering are limited. The absence of a universal software toolkit for integrating heterogeneous monitoring data is established. The need to create an integrated information technology combining fuzzy sets, cluster analysis and means of visualizing results is determined. The section lays the theoretical foundation for the development of an adaptive and scalable system for assessing the technical condition of buildings.

The second section is devoted to the formation of a scientific and methodological basis and the development of combined clustering methods FCM+GA and PCM+GA for assessing the technical condition of construction objects. Algorithms for adaptive determination of cluster centers, degrees of membership and fuzzification parameters in conditions of noisy, incomplete and heterogeneous data have been developed. Modules for fuzzification, analytical core, optimization and DSS have been created, integrated with BIM models, IoT streams and the PostgreSQL database. The innovation lies in the combination of fuzzy logic, genetic optimization and chromosome coding by degrees of membership. The developed Clustering4Build architecture implements a closed loop “optimization → analysis → recommendation → visualization”. This ensures increased stability, speed and accuracy of clustering. The proposed methods integrate mathematical efficiency, information technology and practical adaptability. The section establishes the basis for automated and reliable prediction of the technical condition of buildings.

The third section justifies the use of FCM and PCM algorithms with INMT2 for assessing the technical condition of buildings under uncertainty. The FuzzificationEngine and FCM-Core modules are developed for automatic generation of interval membership functions. Clustering quality indicators, such as hypervolume and sphericity index, are determined for selecting the optimal model. Genetic algorithms are used to optimize fuzzifiers and “zone width” parameters, which increases the accuracy and reproducibility of clustering. The set of objects of the PCM algorithm is expanded to take into account different data densities and volumes. A method for choosing between NMT1 and INMT2 based on the analysis of structural variability of data is proposed. The integration of algorithms with a microservice architecture ensures automation and reliability of technical monitoring. Examples of classification of objects with different densities and volumes are given to demonstrate the effectiveness of the approach.

The fourth section is devoted to the development and research of information technology modules Clustering4Build for automated assessment of the

technical condition of buildings. A microservice architecture with REST interaction is proposed, which ensures modularity, scalability and technological independence of components. Support for clustering based on NMT1 and INMT2 with a type reduction procedure is implemented. Centralized storage of results in PostgreSQL (JSONB) is introduced, which guarantees reproducibility and audit of computational experiments. Integration of genetic optimization and DSS allows adaptively tuning models and generating practical recommendations. A set of application software packages for real-time has been created, which provides reliable and accurate monitoring of buildings. The proposed solutions are integrated with BIM, IoT and DSS, increasing the intelligence of the system. The section demonstrates the practical implementation of complex, automated and adaptive technical monitoring of construction sites.

Keywords: assessment of the technical condition of a building based on IT Clustering4Build, automated monitoring, fuzzy sets, interval models, cluster analysis, genetic optimization, adaptive models, combined FCM+GA and PCM+GA algorithms, microservice architecture, digital data, integration with BIM and IoT.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б»:

1. Gorbatyuk Ie., Terentyev O., Mishchuk D., **Bykov S.** Integrated models of forecasting reliability of decision making of the system of diagnostics of the technical condition of buildings. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2025. № 105. С. 73–78. DOI: <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2025.105.0501>.

2. Tyslenko O., **Bykov S.**, Katin O. System of organization and functioning of mechanisms for ensuring the operational safety of buildings. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2025. Вип. 2(56). С. 91–104. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(2\).91-104](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).91-104).

3. Тисленко О. Б., **Биков С. В.** Аналітичні та діагностичні блоки контролю в цифровому середовищі оцінки структурної надійності. *Управління розвитком складних систем*. 2025. № 64. С. 259–266. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.259-266>.

Статті в закордонних періодичних виданнях, прирівняних до фахових видань категорії «Б» (за умови індексації/цитування):

4. Terentyev O. O., Gorbatyuk Ie. V., Tyslenko O. B., **Bykov S. V.** Methods of damage of the information system of building technical condition diagnostics. *Modern engineering and innovative technologies*. Karlsruhe, 2024. Iss. 35, part 2. P. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2024-35-00-049>.

5. Terentyev O. O., Gorbatyuk Ie. V., Tyslenko O. B., **Bykov S. V.** Program and technical complex of implementation of the information system of diagnostics of the technical condition of buildings. *SWorldJournal*. 2025. Iss. 30, part 1. P. 82–96. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2025-30-01-004>.

6. Terentyev O. O., Gorbatyuk Ie. V., Tyslenko O. B., **Bykov S. V.** Creation of information methods in the diagnosis of industrial buildings. *Modern engineering and innovative technologies*. 2025. Iss. 38, part 1. P. 146–151. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2025-38-01-030>.

Наукові праці апробаційного характеру
(тези доповідей на науково-практичних конференціях)

7. Terentyev O. O., Gorbatyuk Ie. V., Tyslenko O. B., **Bykov S. V.** Methods of diagnosing deformations of building structures. *International scientific conference "Technique and technology of the future '2024"*, Karlsruhe, Germany, 20 October 2024. P. 36–40. DOI: <https://doi.org/10.30890/2709-1783.2024-35-00-027>.
8. Терентьев О. О., Горбатюк Є. В., Тисленко О. Б., **Биков С. В.** Інтегрована модель оцінки надійності рішень для діагностики будівель. *Proceedings of the 6th International scientific and practical conference "Scientific achievements of contemporary society"*, London, United Kingdom, 10–12 January 2025. P. 280–286.
9. Терентьев О. О., Горбатюк Є. В., Тисленко О. Б., **Биков С. В.** Інформаційна технологія управління життєвим циклом будівельних конструкцій і споруд. *Modernization of today's science: experience and trends: coll. of sci. papers "SCIENTIA"*, Singapore, 24 January 2025. P. 192–195. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-24.01.2025>.
10. Терентьев О. О., Горбатюк Є. В., Тисленко О. Б., **Биков С. В.** Моделювання загроз безпеки та вразливості у віртуальній мережевій системі. *Proceedings of the 5th International scientific and practical conference "Science in the modern world: innovations and challenges"*, Toronto, Canada, 23–25 January 2025. P. 169–173.
11. Terentyev O. O., Gorbatyuk Ie. V., Tyslenko O. B., **Bykov S. V.** Creating a model of mobile location. *International scientific conference "Organization of scientific research in modern conditions '2024"*, Seattle, USA, 21 March 2025. P. 25–28. DOI: <https://doi.org/10.30888/2709-2267.2025-30-00-003>.