

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СТЕПАНЮК РОМАН БОРИСОВИЧ

УДК 624.01:69.059]-004.946:006.93(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ МОДЕЛІ ВІДНОВЛЕННЯ
БУДІВЕЛЬ ТА ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД НА ОСНОВІ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

05.23.08 – технологія та організація промислового та цивільного
будівництва

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело _____/Роман Степанюк/

Науковий керівник: д-р техн. наук, професор Поколенко Вадим Олегович

Київ 2025

АНОТАЦІЯ

Степанюк Р.Б. **Організаційно-технологічні моделі відновлення будівель та інженерних споруд на основі інтелектуальних інформаційних систем.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.08 – технологія та організація промислового та цивільного будівництва. – Київський національний університет будівництва і архітектури, Міністерство освіти і науки України. – Київ, 2025.

Дисертацію присвячено розв'язанню науково-прикладної проблеми розроблення організаційно-технологічних моделей і прикладного інструментарію для формалізованої оцінки технічного стану будівель та споруд у складі девелоперських проєктів їх відновлення. Запропонований підхід базується на інтеграції вдосконалених мережевих моделей, технологій BIM-моделювання, методів штучного інтелекту, нечіткої логіки та сценарно-імітаційного аналізу, що дає змогу створити достовірний цифровий опис об'єктів оцінювання та підвищити обґрунтованість управлінських рішень щодо їх подальшого відновлення.

Зміст і новизна результатів дисертації відповідають напрямку розвитку, визначеному нормативно-правовими актами України. Розробки дисертаційного дослідження інтегровані у виконання науково-дослідних і пошукових робіт, здійснених у Київському національному університеті будівництва і архітектури (КНУБА) та Академії будівництва України (відділення «Менеджмент та організація будівництва»). Зокрема, у межах теми «Розбудова сучасного аналітичного інструментарію девелоперського управління підрядним будівництвом» (№0115U000860) реалізовано авторські підходи до поєднання сенсорних мереж і хмарних платформ для збору, моніторингу та аналітики даних щодо деформацій і пошкоджень будівельних конструкцій. Як одна з ключових складових НДР «Розвиток управлінської взаємодії інституційних учасників девелоперських проєктів» (№0121U111793) були використані

авторські рішення, зокрема: «Науково-прикладне забезпечення ранньої діагностики потенційно небезпечних дефектів із застосуванням алгоритмів комп'ютерного зору, глибокого навчання та автоматизованої обробки даних від сенсорів і безпілотників» та «Інтелектуальні системи оцінювання технічного стану і життєвого циклу будівель та споруд на основі інтеграції BIM-моделювання, SCADA-систем і ШІ, адаптованих до змін умов експлуатації для управління життєвим циклом об'єктів будівництва». У рамках НДР «Вдосконалення аналітичного апарату обґрунтування формату девелопменту для проєктів будівництва» (№W4-14-b, Академія будівництва України) реалізовано авторську розробку «Інформаційно-аналітична методика оцінювання залишкового ресурсу будівельних конструкцій в умовах експлуатації та дії надзвичайних факторів».

Наукова новизна дослідження полягає у модернізації науково-методичної основи та вдосконаленні організаційно-технологічних моделей формалізованого опису процесу оцінювання технічного стану в межах девелоперських проєктів відновлення будівель і споруд. Розвинуто мережеву організаційно-технологічну модель, яка отримала нову структурну форму у вигляді **«цифрового багатогранника»**, що охоплює всі етапи життєвого циклу девелоперського проєкту відновлення. Така модель забезпечує інтеграцію можливостей технічної діагностики та інтелектуальних інформаційних систем (ІС) із методами цифровізації, організаційно-технологічного моделювання у форматі «роботи-матриці», принципами будівельного девелопменту та організаційно-структурного інжинірингу. У межах дослідження оцінка технічного стану трактується як ключовий елемент життєвого циклу будівельного девелоперського проєкту, що вимагає комплексного урахування технічних, управлінських, економічних і організаційних параметрів його реалізації. Модель формалізовано охоплює всі стадії життєвого циклу проєкту відновлення та поєднує інструменти технічної діагностики й інтелектуальних інформаційних систем із методами цифровізації та організаційного

інжинірингу. Її параметрична основа забезпечує унікальне поєднання технічних, ресурсних, організаційних і управлінських характеристик – від BIM-моделювання, кошторисів і ресурсних відомостей до оцінки компетенцій виконавців, їх цифрової зрілості, управлінської надійності та готовності до реалізації завдань. При цьому враховуються як внутрішні процесні показники, так і зовнішні чинники ризиків, інноваційності й ритмічності робіт, що підвищує системність і адаптивність управління відновленням інфраструктурних об'єктів.

Зміст та структура роботи підпорядковані вирішенню поставлених в роботі теоретико-методологічних, науково-аналітичних та прикладних завдань.

У *вступі* автором виконано стислий загальний опис своєї роботи, розглядаючи її актуальність, зв'язок з актуальними науковими темами і програмами, надано характеристики наукової новизни і практичної цінності. Виділено складові особистого внеску, наведено інформацію про обсяг публікацій та рівень апробації роботи на науково-практичних конференціях.

В *першому розділі* роботи відображено із опрацюванням теоретичних основ розвитку організації оцінювання технологічного стану будівель та інженерних споруд в умовах цифрової трансформації. Оцінка технічного стану розглядається не лише як інженерне завдання, а як ключова складова девелоперського проєкту, що охоплює повний цикл від діагностики до подальшої експлуатації об'єкта. Цю оцінку автором визначено як комплексний інженерно-цифровий процес, спрямований на безперервне спостереження, діагностику та прогнозування стану конструкцій за допомогою вдосконалених діджитал-адаптованих, мережевих моделей, BIM-моделювання, сенсорної аналітики та інших компонент інтелектуальних аналітичних систем. Такий підхід забезпечує адаптацію до умов експлуатації, своєчасне виявлення критичних відхилень і підвищує точність рішень щодо експлуатації, реконструкції чи відновлення об'єктів. Дослідженнями першого розділу доведено, що організаційно-технологічні моделі циклу відновлення будівель та

споруд на сучасні цифровій основі мають охоплювати як технологічні, управлінські, вартісні та інші аспекти циклу проєкту та умов його впровадження.

В *другому розділі* дисертації відображено зміст і результати формування загально-методичного підґрунтя дослідження – відповідно до цільового спрямування оновлення підходів формалізованого опису змісту девелоперських проєктів відновлення будівель та інженерних споруд. Така інтеграція забезпечує розвиток інноваційних технологій моніторингу технічного стану будівельних конструкцій і споруд, зокрема об'єктів критичної інфраструктури, зокрема мостових переходів. Запропонований підхід сприяє формуванню інтелектуальних інформаційних систем, здатних забезпечувати ефективну діагностику, прогнозування та управління процесами відновлення інженерних об'єктів. На ґрунті досліджень даного розділу здійснено декомпозицію процесу технічного обстеження інженерних споруд на окремі функціонально-логічні етапи, які охоплюють підготовчі, інструментальні, аналітичні та управлінські процедури, що дозволило сформувати адаптивну модель організації моніторингу в умовах експлуатаційної невизначеності. Сформовано схему функціональну схему взаємодії організаційно-технологічного супроводу оцінювання з цифровими модулями обробки та інтерпретації діагностичних даних.

В *третьому розділі* роботи відображено зміст та інновації створеного науково-аналітичного триступеневого інструментарію супроводу проєктів відновлення будівель та інженерних споруд. Інструментарій базується на інтеграції мережевої моделі нового типу, цифрових технологій, BIM-моделювання та інтелектуальних алгоритмів, що дає змогу здійснювати діагностику об'єктів у режимі реального часу. Перший рівень охоплює автоматизоване збирання й обробку даних від сенсорів і безпілотних літальних апаратів із використанням комп'ютерного зору та глибокого навчання. Другий рівень – моделювання параметрів стану конструкцій на основі BIM та SCADA-

систем із залученням штучного інтелекту. Третій рівень – інтеграція інтелектуальних моделей у системи управління проектом відновлення, що дозволяє підвищити точність прогнозів, оптимізувати обслуговування та знизити експлуатаційні ризики.

Четвертий розділ роботи зосереджений на розробці алгоритму та комплексу програм для супроводу процесів організації будівництва в проектах відновлення інженерних споруд. Інноваційність запропонованого в дисертації алгоритму оцінювання технічного стану мостових споруд полягає у його багаторівневій побудові та інтеграції вдосконалених мережевих моделей із цифровими й аналітичними технологіями в межах девелоперського проекту відновлення. Алгоритм охоплює етапи формування бази вхідних даних, створення BIM-моделі споруди у вигляді цифрового двійника та розгортання сенсорної системи для безперервного моніторингу параметрів. Застосування методів нечіткої логіки та машинного навчання дозволяє отримувати інтегральну оцінку технічного стану мосту, тоді як використання байесівської оптимізації забезпечує високоточне прогнозування розвитку дефектів. Автоматизоване оновлення цифрової моделі сприяє формуванню актуальних карт пошкоджень у режимі реального часу та їх включенню до системи управління проектом. Водночас алгоритм виходить за межі технічного аналізу – він формує аналітичні висновки й рекомендації для девелопера, підвищуючи точність діагностики, оперативність прийняття рішень і загальну ефективність управління. Такий підхід створює адаптивне цифрове підґрунтя для забезпечення надійності, стійкості та ресурсоефективності процесів відновлення інфраструктурних об'єктів.

Архітектура створеного комплексу побудована з функціональних модулів, які реалізують 10-етапну модель аналізу технічного стану об'єктів із використанням технологій штучного інтелекту. Система передбачає адаптацію до специфіки кожного об'єкта через вбудовану модель оптимізації та застосовує нейронні мережі для вирішення завдань технічної діагностики

мостових конструкцій. Забезпечено замкнутий цикл оброблення інформації, що охоплює безперервне зчитування, передавання, зберігання та аналітичну інтерпретацію даних у режимі реального часу. Результатом роботи комплексу програм є формалізована оцінка технічного стану споруди у шести рівнях – від «критично-незадовільного» до «абсолютно надійного», з відображенням як лінгвістичної категорії, так і числового інтервалу в балах від 0 до 100. На підставі оцінок стану комплекс програм надає найбільш очікувані альтернативи графіку виконання робіт та кошторисної документації проєкту.

В *додатках дисертаційної роботи* відображено сутність та інновації щодо впровадження результатів дисертаційної роботи в практиці технічного оцінювання стану мостових споруд в рамках проєктів відновлення, які готувались та реалізовувались будівельними компаніями «Архітектурно-будівельні новації», «Альфа-сервіс» та Інститутом місцевого розвитку.

Теоретична цінність дисертаційної роботи полягає у розвитку науково-методичних основ і вдосконаленні організаційно-технологічних моделей формалізованого оцінювання технічного стану об'єктів у складі девелоперських проєктів відновлення будівель і споруд. У межах дослідження запропоновано інноваційний науковий підхід, який поєднує цифрові платформи, BIM-моделювання, сенсорну інфраструктуру та алгоритми штучного інтелекту для створення цифрових двійників конструкцій і прогнозування розвитку їх дефектів. Розвинуто мережеву модель девелоперського проєкту відновлення мостів шляхом інтеграції цифрової, організаційно-технологічної та управлінської складових у форматі «робота-матриця», представленому як «цифровий багатогранник», що відображає всі стадії життєвого циклу проєкту та забезпечує поєднання методів технічної діагностики, цифровізації й організаційного інжинірингу. Параметрична основа моделі підвищує ефективність системного управління процесами відновлення інженерних споруд. Модернізовано організацію циклу комплексного оцінювання технічного стану конструкцій завдяки поєднанню адаптивної

сенсорної мережі з алгоритмічною обробкою даних і застосуванням методів машинного навчання. Розроблено багатоетапний алгоритм прогнозування стану мостових споруд, що включає створення інформаційної моделі в середовищі Revit, експорт і структурування параметрів, формування вхідних матриць та навчання моделей штучного інтелекту для високоточного прогнозування. У контексті девелоперських проєктів відновлення вдосконалено науково-методичний підхід сполучення результатів оцінювання в BIM-середовищі, що забезпечує автоматичне оновлення цифрової моделі споруди відповідно до фактичного стану її елементів. Підхід інтегрується із системами управління інфраструктурою в межах девелоперського проєкту відновлення, забезпечуючи автоматизовану обробку нових даних, контроль достовірності прогнозів у реальному часі та адаптивне оновлення параметрів моделі. Отримані результати суттєво розширюють теоретичну базу наукової спеціальності «Технологія та організація промислового та цивільного будівництва», поглиблюючи концептуальні засади цифровізації процесів технічного оцінювання, формалізації організаційно-технологічних рішень та підвищення ефективності систем управління відновленням інженерних споруд.

Практичне значення результатів дисертації полягає у створенні та впровадженні організаційно-технологічних моделей і цифрового інструментарію для комплексного оцінювання та прогнозування технічного стану інженерних будівель і споруд. Запропонована система базується на вдосконалених цифрових, мережевих моделях, сенсорних мережах, технологіях комп'ютерного зору, глибокого навчання, BIM-моделювання, що забезпечує оперативне виявлення пошкоджень, оцінювання ризиків та планування відновлювальних заходів у режимі реального часу. Подані в роботі моделі дозволяють автоматизувати процеси аналізу технічного стану конструкцій в складі ДПВ та формування цифрових двійників об'єктів, підвищуючи точність діагностики та прогнозування. Створений на ґрунті результатів дисертації комплекс прикладних програм сприяє оптимізації програм технічного

обслуговування, зменшенню витрат на інспекцію, підвищенню безпеки експлуатації та скороченню термінів ухвалення управлінських рішень. Ці результати є новітньою прикладною основою прийняття рішень для дорожньо-мостових організацій, підприємств житлово-комунального господарства, органів технічного нагляду та девелоперських структур, що займаються реконструкцією та відновленням інфраструктурних об'єктів. Розроблений інструментарій створює підґрунтя для цифрової трансформації систем управління життєвим циклом та середовища девелопменту для проєктів відновлення інженерних споруд.

Ключові слова: організаційно-технологічні моделі, девелоперський проєкт, цифрова модель, мережева модель, проєкт відновлення, мостова споруда, технічний стан, оцінка стану, параметри моделі, цифрові платформи, штучний інтелект, нечітка логіка, «fuzzy»-технології; «цифровий багатогранник».

ABSTRACT

Stepaniuk R. B. Organizational and technological models of restoration of buildings and engineering structures based on intellectual information systems.

– Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, specialty 05.23.08 – technology and organization of industrial and civil construction. – Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to solving the scientific and applied problem of developing organizational and technological models and applied tools for a formalized assessment of the technical condition of buildings and structures as part of development projects for their restoration. The proposed approach is based on the integration of advanced network models, BIM modeling technologies, artificial intelligence methods, fuzzy logic, and scenario-simulation analysis, which allows

creating a reliable digital description of the assessment objects and increasing the validity of management decisions regarding their further restoration.

The content and novelty of the results of the dissertation correspond to the direction of development determined by the regulatory legal acts of Ukraine. The developments of the dissertation research are integrated into the implementation of scientific research and search works carried out at the Kyiv National University of Construction and Architecture (KNUCA) and the Academy of Construction of Ukraine (department "Construction Management and Organization"). In particular, within the framework of the topic "Development of modern analytical tools for developer management of contract construction" (№0115U000860), the author's approaches to combining sensor networks and cloud platforms for collecting, monitoring and analyzing data on deformations and damage to building structures have been implemented. As one of the key components of the research project "Development of management interaction of institutional participants in development projects" (№0121U111793), the author's solutions were used, in particular: "Scientific and applied support for early diagnostics of potentially dangerous defects using computer vision algorithms, deep learning and automated data processing from sensors and drones" and "Intelligent systems for assessing the technical condition and life cycle of buildings and structures based on the integration of BIM modeling, SCADA systems and AI, adapted to changes in operating conditions for managing the life cycle of construction objects". As part of the research project "Improvement of the analytical apparatus for substantiating the development format for construction projects" (№W4-14-b, Academy of Construction of Ukraine), the author's development "Information and analytical methodology for assessing the residual resource of building structures under operating conditions and under the influence of extraordinary factors" was implemented.

The scientific novelty of the study lies in the modernization of the scientific and methodological basis and the improvement of organizational and technological models of the formalized description of the process of assessing the technical

condition within the framework of development projects for the restoration of buildings and structures. A network organizational and technological model has been developed, which has received a new structural form in the form of a “digital polyhedron”, covering all stages of the life cycle of a development project for restoration. Such a model ensures the integration of the capabilities of technical diagnostics and intelligent information systems (IIS) with methods of digitalization, organizational and technological modeling in the “robot-matrix” format, the principles of construction development and organizational and structural engineering. Within the framework of the study, the assessment of the technical condition is interpreted as a key element of the life cycle of a construction development project, which requires comprehensive consideration of technical, managerial, economic and organizational parameters of its implementation. The model formally covers all stages of the life cycle of a restoration project and combines tools of technical diagnostics and intelligent information systems with methods of digitalization and organizational engineering. Its parametric basis provides a unique combination of technical, resource, organizational and managerial characteristics – from BIM modeling, estimates and resource information to the assessment of the competences of performers, their digital maturity, managerial reliability and readiness to implement tasks. At the same time, both internal process indicators and external factors of risks, innovation and rhythm of work are taken into account, which increases the systematicity and adaptability of the management of the restoration of infrastructure facilities.

The content and structure of the work are subordinated to the solution of the theoretical and methodological, scientific and analytical and applied tasks set in the work. In *the introduction*, the author provides a brief general description of his work, considering its relevance, connection with current scientific topics and programs, and provides characteristics of scientific novelty and practical value. The components of personal contribution are highlighted, information is provided on the volume of

publications and the level of approval of the work at scientific and practical conferences.

The *first section* of the work reflects the development of the organization of assessment of the technological condition of buildings and engineering structures in the context of digital transformation, with the elaboration of the theoretical foundations. Assessment of the technical condition is considered not only as an engineering task, but as a key component of a development project, covering the full cycle from diagnostics to further operation of the facility. This assessment is defined by the author as a complex engineering and digital process aimed at continuous observation, diagnostics and prediction of the state of structures using advanced digitally adapted, network models, BIM modeling, sensor analytics and other components of intelligent analytical systems. This approach ensures adaptation to operating conditions, timely detection of critical deviations and increases the accuracy of decisions regarding the operation, reconstruction or restoration of objects. The research of the first section has proven that organizational and technological models of the restoration cycle of buildings and structures on a modern digital basis should cover both technological, managerial, cost and other aspects of the project cycle and the conditions of its implementation.

The *second section* of the dissertation reflects the content and results of the formation of a general methodological basis for the study – in accordance with the target direction of updating approaches to the formalized description of the content of development projects for the restoration of buildings and engineering structures. Such integration ensures the development of innovative technologies for monitoring the technical condition of building structures and structures, in particular critical infrastructure objects, in particular bridge crossings. The proposed approach contributes to the formation of intelligent information systems capable of providing effective diagnostics, forecasting and management of the restoration processes of engineering objects. Based on the research in this section, the process of technical inspection of engineering structures was decomposed into separate functional and

logical stages, which include preparatory, instrumental, analytical and management procedures, which allowed the formation of an adaptive model of monitoring organization in conditions of operational uncertainty. A functional diagram of the interaction of organizational and technological support of the assessment with digital modules for processing and interpreting diagnostic data was formed.

The *third section* of the work reflects the content and innovations of the created scientific and analytical three-stage toolkit for supporting building and engineering structure restoration projects. The toolkit is based on the integration of a new type of network model, digital technologies, BIM modeling and intelligent algorithms, which allows for real-time diagnostics of objects. The first level covers automated data collection and processing from sensors and unmanned aerial vehicles using computer vision and deep learning. The second level is modeling of structural state parameters based on BIM and SCADA systems with the involvement of artificial intelligence. The third level is the integration of intelligent models into restoration project management systems, which allows for increasing the accuracy of forecasts, optimizing maintenance and reducing operational risks.

The *fourth section of the work* focuses on the development of an algorithm and a set of programs to support construction organization processes in engineering structure restoration projects. The innovativeness of the algorithm for assessing the technical condition of bridge structures proposed in the dissertation lies in its multi-level construction and integration of advanced network models with digital and analytical technologies within the framework of a development restoration project. The algorithm covers the stages of forming an input database, creating a BIM model of the structure in the form of a digital twin, and deploying a sensor system for continuous monitoring of parameters. The use of fuzzy logic and machine learning methods allows for an integral assessment of the technical condition of the bridge, while the use of Bayesian optimization provides highly accurate prediction of the development of defects. Automated updating of the digital model contributes to the formation of up-to-date damage maps in real time and their inclusion in the project

management system. At the same time, the algorithm goes beyond technical analysis - it forms analytical conclusions and recommendations for the developer, increasing the accuracy of diagnostics, speed of decision-making, and overall management efficiency. This approach creates an adaptive digital foundation for ensuring reliability, sustainability and resource efficiency of infrastructure restoration processes.

The architecture of the created complex is built from functional modules that implement a 10-stage model of analysis of the technical condition of objects using artificial intelligence technologies. The system provides for adaptation to the specifics of each object through a built-in optimization model and uses neural networks to solve technical diagnostics of bridge structures. A closed information processing cycle is provided, covering continuous reading, transmission, storage and analytical interpretation of data in real time. The result of the work of the program complex is a formalized assessment of the technical condition of the structure in six levels – from "critically unsatisfactory" to "absolutely reliable", with a reflection of both the linguistic category and the numerical interval in points from 0 to 100. Based on the state assessments, the program complex provides the most expected alternatives to the work schedule and project estimate documentation.

The appendices of the dissertation reflect the essence and innovations regarding the implementation of the results of the dissertation in the practice of technical assessment of the condition of bridge structures within the framework of restoration projects, which were prepared and implemented by the construction companies "Architectural and Construction Innovations", "Alfa-Service" and the Institute of Local Development.

The theoretical value of the dissertation work lies in the development of scientific and methodological foundations and improvement of organizational and technological models of formalized assessment of the technical condition of objects as part of development projects for the restoration of buildings and structures. The research proposes an innovative scientific approach that combines digital platforms,

BIM modeling, sensor infrastructure and artificial intelligence algorithms to create digital twins of structures and predict the development of their defects. A network model of a development project for the restoration of bridges has been developed by integrating digital, organizational, technological and management components in the “work-matrix” format, presented as a “digital polyhedron”, which reflects all stages of the project life cycle and provides a combination of methods of technical diagnostics, digitalization and organizational engineering. The parametric basis of the model increases the efficiency of system management of engineering structures restoration processes. The organization of the cycle of comprehensive assessment of the technical condition of structures has been modernized by combining an adaptive sensor network with algorithmic data processing and the use of machine learning methods. A multi-stage algorithm for predicting the condition of bridge structures has been developed, which includes creating an information model in the Revit environment, exporting and structuring parameters, forming input matrices, and training artificial intelligence models for high-precision forecasting. In the context of development restoration projects, the scientific and methodological approach of combining assessment results in the BIM environment has been improved, which ensures automatic updating of the digital model of the structure in accordance with the actual state of its elements. The approach is integrated with infrastructure management systems within the development restoration project, ensuring automated processing of new data, real-time control of the reliability of forecasts, and adaptive updating of model parameters. The results obtained significantly expand the theoretical basis of the scientific specialty "Technology and Organization of Industrial and Civil Construction", deepening the conceptual principles of digitalization of technical assessment processes, formalization of organizational and technological solutions and increasing the efficiency of engineering structure restoration management systems.

The practical significance of the dissertation results for practice lies in the creation and implementation of organizational and technological models and digital

tools for comprehensive assessment and forecasting of the technical condition of engineering buildings and structures. The proposed system is based on advanced digital, network models, sensor networks, computer vision technologies, deep learning, BIM modeling, which provides operational detection of damage, risk assessment and planning of restoration measures in real time. The models presented in the work allow to automate the processes of analyzing the technical condition of structures in the DPR and forming digital twins of objects, increasing the accuracy of diagnostics and forecasting. The complex of applied programs created on the basis of the results of the dissertation contributes to the optimization of maintenance programs, reduction of inspection costs, increase of operational safety and reduction of terms of adoption of management decisions. These results are the newest applied basis of decision-making for road and bridge organizations, housing and communal enterprises, technical supervision bodies and development structures engaged in reconstruction and restoration of infrastructure facilities. The developed toolkit creates the basis for digital transformation of life cycle management systems and development environment for projects of restoration of engineering structures.

Keywords: organizational and technological models, development project, digital model, network model, restoration project, bridge structure, technical condition, condition assessment, model parameters, digital platforms, artificial intelligence, fuzzy logic, "fuzzy" technologies, "digital polyhedron".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України, які індексуються в міжнародних наукометричних базах:

1. Малихін М.О., **Степанюк Р.Б.**, Рижакова Г.М., Кончаківський О.І., Ніколаєва М.Ю. Застосування інформаційного моделювання протягом життєвого циклу об'єкту будівництва. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2021. №48(2). С. 98-105. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.48\(2\)](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.48(2)). *Особистий внесок*: відображено основні кроки оновлення засад формалізованого супроводу девелоперських будівельних проєктів.

2. **Степанюк Р.Б.** Системний підхід до реконструкції інженерних споруд із використанням інтелектуальних інформаційних систем та нормативно-технічних регламентів. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2022. № 49(2). С. 159-170. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).159-170](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).159-170)

3. **Степанюк Р.Б.**, Поколенко В.О., Ратніков Д.Г. Інтеграція інтелектуальних інформаційних систем в технологію процесів реконструкції та відновлення експлуатаційної придатності інженерних споруд. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2023. №51(2). С. 35-46. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51\(2\).35-46](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(2).35-46). *Особистий внесок*: опис інноваційного змісту цифрової мережевої організаційно-технологічної моделі опису девелоперських проєктів відновлення на ґрунті ІІС.

4. Хоменко О., Петренко Г., **Степанюк Р.** Цільові пріоритети та формалізовані індикатори трансформації операційних систем стейкхолдерів будівництва. *Управління розвитком складних систем*, 2023, (56), 173-180. DOI: 10.32347/2412-9933.2023.56.173-180. *Особистий внесок*: розроблено

структурно-функціональну модель адаптації операційного середовища до викликів сучасного будівельного девелопменту в частині побудови логіко-аналітичного ядра інтелектуальної системи моніторингу технічного стану будівельних конструкцій.

5. Дружинін М., Малихін М., **Степанюк Р.** Інтеграція прикладних модулів IPD до складу організаційно-технологічних інструментів управління будівництвом. *Містобудування та територіальне планування*, 2024, (86), 261-271. DOI: 10.32347/2076-815x.2024.86.261-271. *Особистий внесок*: запропоновано модель взаємодії IPD-компонентів з цифровими платформами управління проектами на базі BIM, що лягло в основу концептуального підходу до формалізації організаційно-технологічного середовища системи МО-ТС-БКС, розробленої у межах дисертаційного дослідження.

6. Дружинін М., Малихін М., **Степанюк Р.** Науково-прикладні засади організаційно-технологічного моделювання девелоперських проектів у форматі стратегічних інновацій. *Містобудування та територіальне планування*, 2024, (87), 193-205. DOI: 10.32347/2076-815x.2024.87.193-205. *Особистий внесок*: систематизовано методичні підходи до адаптації цифрових інструментів у контексті управління життєвим циклом об'єктів та запропоновано концепцію використання інтелектуальних інформаційних систем як елемента інноваційного супроводу та моніторингу БКС.

7. Дружинін М., **Степанюк Р.**, Антипенко Е. Формування аналітичних компонент інтегрованої реалізації будівельного проекту як цифрової екосистеми. *Просторовий розвиток*, 2024, (10), 287-300. DOI: 10.32347/2786-7269.2024.10.287-300. *Особистий внесок*: обґрунтовано та запропоновано аналітичну модель інтеграції функціональних компонент цифрової екосистеми у структуру реалізації будівельного проекту; розроблено алгоритми взаємодії модулів моніторингу технічного стану конструкцій із цифровими платформами управління, що стало методологічною основою для формування системи організаційно-технологічного забезпечення.

8. Дружинін, М., **Степанюк, Р.**, Гергі Д. Цифрові моделі організації будівництва на ґрунті інтеграційного підходу та SMART-управління. *Управління розвитком складних систем*, 2024, (60), 165-173. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.165-173. *Особистий внесок*: сформульовано логіку побудови цифрової моделі моніторингу технічного стану конструкцій як підсистеми загального інтеграційного середовища цифрові моделі організації будівництва.

9. Фесун А.С., Кончаківський О.І., **Степанюк Р.Б.** Концептуально-аналітичні особливості забезпечення бізнес-стійкості підприємств у мультипроектному середовищі будівельного девелопменту. *Будівельне виробництво*, 2024, (77), 58-66. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.77>. URL: <https://ndibv-building.com.ua/index.php/Building/article/view/509/241>. *Особистий внесок*: сформовано прикладні положення щодо алгоритмізації технічного моніторингу конструкцій як чинника управління ризиками, що інтегровано в загальну концепцію організаційно-технологічного забезпечення життєвого циклу об'єктів будівництва.

10. **Степанюк Р.** (2024). BIM 4D–7D як основа інтегрованого управління життєвим циклом об'єктів у промисловому та цивільному будівництві. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, 2024, 53(3), 262–274. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.53\(3\).262-274](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.53(3).262-274).

11. **Степанюк Р.Б.**, Антипенко Є.Ю., Валінкевич Н.В. Структурно-динамічна трансформація операційної системи підприємств будівельного девелопменту: аналітико-прикладні аспекти. *Просторовий розвиток*, 2025, (11), 510-521. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.11.510-521. *Особистий внесок*: розроблено підходи до цифрової трансформації операційної системи девелоперських підприємств на основі інтеграції інтелектуальних модулів технічного моніторингу будівельних конструкцій. Запропоновано механізми формалізації управлінських рішень у контексті забезпечення надійності об'єктів, що на пряму корелює з науковими результатами дисертації щодо

впровадження інженерно-цифрових систем оцінки технічного стану конструкцій у девелопменті.

Статті в наукових періодичних виданнях держав ЄС:

12. **Stepaniuk R.** Digital transformation of monitoring and assessment of building structures and facilities using intelligent SHM solutions. *Colloquium-journal/Technical sciences*. 2025. №53 (246), pp. 39-42. (Польща). doi.org/10.5281/zenodo.15720737. URL: <https://zenodo.org/records/15720737>

Монографії:

13. **Степанюк Р.Б.** BIM-орієнтована модель моніторингу технічного стану будівельних конструкцій на основі інтелектуальних інформаційних систем (розділ 6.1) / Колективна монографія: *Організаційно-технологічний девелопмент та інтегрована реалізації проєктів в будівництві*. К.: ПП Сердюк В.Л., 2024. С.164-174. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/146a567b-c79a-4b18-81b4-be3491d0a4c3/content>

14. **Степанюк Р.Б.** Організаційно-технологічне забезпечення оцінки технічного стану будівельних конструкцій у цифровому моніторингу життєвого циклу споруд (розділ 5.3): колективна монографія. *Економіко-управлінський та організаційно-технологічний інструментарій стратегічних інновацій в будівництві*. Київ, 2025. С. 225-237. URL: irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=S&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21FMT=fullwebr&S21ALL=%28<.>A%3DСТЕПАНИЮК%20Р.%20Б.<.>%29&FT_REQUEST=&FT_PREFIX=&Z21ID=&S21STN=1&S21REF=10&S21CNR=20

Матеріали конференцій, де здійснено апробацію роботи:

15. **Stepaniuk R.** Advanced approaches to the assessment of the technical condition of buildings using intelligent information systems: technological efficiency and prospects for development. *Materiály XVI Mezinárodní vědecko - praktická*

konference «Věda a vznik», Volume 4: Praha. Publishing House «Education and Science», 2020. P. 69-71.

16. **Stepaniuk R.** Intelligent System-Based Digital Transformation of Engineering Diagnostics for Assessing the Structural Integrity of Buildings. Materiały XVI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «*Wykształcenie i nauka bez granic - 2020*», Volume 1 Przemysł: Nauka i studia, 2020. P. 62-65.

17. **Stepaniuk R.** Advanced Approaches to the Assessment of the Technical Condition of Buildings Using Intelligent Information Systems: Technological Efficiency and Prospects for Development. Матеріали за XVII міжнародна научна практична конференція «*Новини на научний прогрес*», 2022: Софія: Бял ГРАД-БГ. P.55-57.

18. **Степанюк Р.Б.** Формалізація організаційно-технологічного супроводу технічного обстеження будівельних споруд із застосуванням цифрових технологій. Програма круглого столу «*Налаштування освітніх траєкторій в підготовці менеджерів будівництва в контексті відбудови України*». К.: КНУБА, 2023. С.24.

19. **Степанюк Р.Б.** Адаптація моделей нечіткого виведення з використанням штучних імунних систем до умов організації будівництва в проєктах післявоєнного відновлення інфраструктури. V Міжнародна науково-практична конференція «*Енергоощадні машини і технології*», присвячена 60-річчю від дня заснування факультету автоматизації і інформаційних технологій КНУБА, 2024. С. 46.

20. **Stepaniuk R.** Formalization of Structural Health Monitoring using adaptive digital algorithms. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «*Американські стандарти освіти в Україні*» в рамках проєкту «*Впровадження американських стандартів освіти в Україні: громадянська участь, підвищення якості та демократичний розвиток*», 14-15 червня 2024 року, Київ. С. 71-72.

21. **Степанюк Р.Б.** Модифікація моделей нечіткого виведення з використанням штучних імунних систем для адаптації до умов будівництва в проектах реконструкції інфраструктури після війни. Програма та тези доповідей круглого столу *«Управлінські, економічні, облікові, організаційно-технологічні, цифрові та комунікаційні аспекти поліпшення освітнього та наукового процесів як імперативи трансформації будівельної галузі»*. Київ: 2024. С. 24.

22. **Степанюк Р.Б.** Нагальність зміни змісту топології операційних систем та організаційних структур управління будівельним підприємством на ґрунті цифровізації. Бізнес-форум *«Вектори управлінських, операційних, цифрових та технологічних трансформацій будівництва в умовах викликів воєнного часу»*. К.: КНУБА, 2024, С. 18.

ЗМІСТ

ВСТУП	25
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОРГАНІЗАЦІЇ В ПРОЄКТАХ ВІДНОВЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД В УМОВАХ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ.....	34
1.1. Систематизація сучасного стану та напрямів розвитку технології й організації оцінювання технічного стану будівельних конструкцій	34
1.2. Потенціал функціонально-технологічної адаптації концепцій і засобів інтелектуальних інформаційних систем до процесів діагностики та аналізу технічного стану інженерних споруд (на прикладі мостів).....	49
1.3. Концептуальні засади інженерно-цифрового моделювання систем оцінювання та управління технічним станом будівельних конструкцій	58
Висновки до 1-го розділу	65
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНО-МЕТОДИЧНЕ ПІДґРУНТЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМАЛІЗАЦІЇ ЦИКЛУ ПРОЄКТІВ ВІДНОВЛЕННЯ У ДІДЖИТАЛ-АДАПТОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ОРГАНІЗАЦІЇ БУДІВНИЦТВА.....	69
2.1. Визначення методичних засад формування підсистеми цифрової інфраструктури оцінювання та контролю технічного стану будівельних конструкцій і споруд.....	69
2.2. Формування логіко-аналітичного ядра системи оцінювання технічного стану з використанням штучного інтелекту, нечіткої логіки та BIM-моделювання.....	86
2.3. Розроблення сценаріїв цифрового супроводу обстежень і алгоритмізації інженерно-технологічних рішень у процесах відновлення будівель і споруд	107
Висновки до 2-го розділу	116

РОЗДІЛ 3. АНАЛІТИЧНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ФОРМАЛІЗОВАНОГО ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЄКТУ ВІДНОВЛЕННЯ СПОРУД У ЦИФРОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ БУДІВЕЛЬНОГО ДЕВЕЛОПМЕНТУ, З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....	121
3.1. Оцінка достовірності компонент інтелектуальних інформаційних систем на об'єктах транспортної та громадської інфраструктури в контексті завдань оцінювання технічного стану будівельних конструкцій в складі проєктів відновлення.....	121
3.2. Моделювання процесу оцінювання технічного стану мостових споруд із застосуванням вдосконалених мережевих моделей, нечіткої логіки та інтелектуальних інформаційних систем	127
3.3. Інтеграція аналітичних складових інструментарію для його адаптації до практики обстеження та відновлення будівель і інженерних споруд.....	136
Висновки до 3-го розділу	158
РОЗДІЛ 4. ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ БУДІВЕЛЬ ТА ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД.....	162
4.1. Розроблення алгоритму оцінювання стану інженерних споруд на основі інтегрованої ВІМ-моделі.....	162
4.2. Використання методів нечіткої логіки у структурі алгоритму оцінювання стану конструктивних елементів мостів.....	170
4.3. Формування комплексу прикладних програм для реалізації алгоритму оцінювання стану будівель та інженерних споруд із ІС.....	177
Висновки до 4-го розділу	191
ВИСНОВКИ	195
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	201
ДОДАТКИ	216

ВСТУП

Актуальність теми. Вплив військових дій в Україні зумовлює безпрецедентну деструктивність та комплексність пошкоджень будівельних конструкцій, що виходять за межі розрахункових нормативів та вимагають розробки нових підходів до оцінки їхнього стану. Унаслідок інтенсивних зовнішніх навантажень, спричинених вибуховими хвилями, ударними імпульсами, сейсмічними коливаннями техногенного походження, а також термічним впливом та фрагментацією конструктивних елементів, формується напружено-деформований стан, який виходить за межі розрахункових нормативних параметрів, що призводить до втрати несучої здатності, порушення цілісності просторово-силової схеми, дестабілізації роботи конструкційних вузлів, а також істотного зниження довговічності та експлуатаційної безпеки об'єктів будівництва.

Аналіз праць науковців та практиків в галузях технічного оцінювання, технології та організації будівництва, – І. Арутюнян, Т. Гончаренко, А. Гурін, Г. Гайна, П. Григоровський, А. Дворник, Т. Кравчуновська, О. Малишев, О. Молодід, О. Осипов, В. Павлюк, В. Поколенко, Д. Попруга, О. Поплавський, А. Радкевич, Г. Тонкачєєв, Р. Трач, О. Тугай, В. Тивонюк, С. Хачатурян, М. Хоружий, І. Шумаков, Th. Wierzbicki та ін. – дозволив стверджувати, що наявні стандартизовані методики є трудомісткими та недостатньо оперативними, що унеможливлює своєчасне виявлення критичних пошкоджень.

Спираючись на вищевикладені міркування, є належні підстави стверджувати: актуальність дослідження на обрану тему зумовлена низкою чинників. По-перше, існуючі стандартизовані підходи до технічного обстеження є трудомісткими, затратними та недостатньо оперативними, що значно знижує ефективність прийняття рішень щодо обслуговування, реконструкції або демонтажу конструкцій. По-друге, стрімкий розвиток

цифрових технологій та інтелектуальних інформаційних систем відкриває нові можливості для створення інтелектуальних систем як інструментів оцінювання. І, нарешті, застосування таких систем дозволяє здійснювати безперервне, високоточне, багаторівневе спостереження за технічним станом конструкцій у реальному часі, автоматизувати інтерпретацію результатів та прогнозувати потенційні ризики пошкоджень чи втрати несучої здатності.

Прийнято наступну робочу гіпотезу дослідження: пріоритетним для нинішніх умов технології та організації будівництва в проєктах відновлення є створення *науково-прикладних моделей інтеграції організаційно-технологічного моделювання та засад будівельного девелопменту з інтелектуальними інформаційними системами* – для наступного застосування при оцінювання технічного стану споруд, враховуючи не лише інженерні параметри, а й експлуатаційні умови, часові обмеження, вимоги до безпеки, готовність середовища девелопменту та організацій-виконавців до впровадження проєкту.

Традиційні підходи до реконструкції є недостатньо ефективними через низький рівень цифровізації та відсутність адаптивних рішень. Використання інтелектуальних інформаційних систем, BIM-технологій і штучного інтелекту відкриває широкі можливості для створення організаційно-технологічних моделей, здатних забезпечити точне оцінювання стану об'єктів, оптимізацію процесів відновлення та підвищення надійності інфраструктури. Дослідження спрямоване на формування організаційно-технологічних моделей комбінованого змісту, які за аналітичною конструкцією поєднують властивості організаційно-технологічних (типу «роботи-дуги», «роботи-вершини», «роботи-матриці»), організаційно-управлінських і цифрових підходів. Такі моделі повинні виконувати функції не лише класичного планування, але й забезпечувати цифрове відтворення багаторівневої структури відновлювальних робіт, інтегруючи технологічні процеси з управлінськими та ресурсними рішеннями.

Розробка таких моделей є пріоритетним напрямом розвитку сучасного будівельного комплексу та має значну науково-практичну актуальність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Розробки дисертації є складовими науково-дослідних та науково-пошукових тем, що виконувались у Київському національному університеті будівництва і архітектури (КНУБА) та Академії будівництва України (відділення «Менеджмент та організація будівництва»). Зокрема, у межах теми «Розбудова сучасного аналітичного інструментарію девелоперського управління підрядним будівництвом» (№0115U000860) були використані авторські підходи до інтеграції сенсорних мереж та хмарних сервісів для збору та аналізу даних про деформації та пошкодження конструкцій. В якості однієї із провідних компонент НДР «Розвиток управлінської взаємодії інституційних учасників девелоперських проєктів» (№0121U111793) використано такі авторські розробки як «Науково-прикладне забезпечення раннього виявлення потенційно критичних дефектів завдяки застосуванню алгоритмів комп'ютерного зору, глибокого навчання та автоматизованої обробки вхідних даних від сенсорів і дронів» та «Інтелектуальні систем оцінювання технічного стану та життєвого циклу будівель та споруд на ґрунті інтеграції BIM-моделювання, SCADA-системи та ІШ, що адаптуються до змінних умов експлуатації для управління життєвим циклом об'єктів будівництва». В рамках НДР «Вдосконалення аналітичного апарату обґрунтування формату девелопменту для проєктів будівництва» (№W4-14-b, Академія будівництва України) було використано авторську розробку «Інформаційно-аналітична оцінка залишкового ресурсу будівельних конструкцій в умовах експлуатації та надзвичайних ситуацій».

Мета дисертаційної роботи полягає в удосконаленні концептуально-методичної основи та науково-прикладного інструментарію для створення організаційно-технологічних моделей формалізованого опису проєктів відновлення будівель і споруд із використанням інтелектуальних інформаційних систем.

Для досягнення поставленої в роботі мети визначено наступний перелік завдань дослідження:

1. Дослідження стану та вектору розвитку організації будівництва в контексті вирішення завдань оцінки технічного стану будівель і споруд (БІС) в циклі девелоперського проєкту відновлення БІС.

2. Дослідження тенденцій трансформації змісту оцінки технічного стану будівель і споруд в девелоперських проєктах відновлення (тут і далі використано аббревіатуру ДПВ) шляхом залучення можливостей інтелектуальних інформаційних систем (ІС).

3. Дослідження складу компонент науково-методичного базису роботи для наступного формування діджитал-адаптованого простору прийняття рішень щодо технології та організації відновлення в будівельному проєкті.

4. Формування цільових організаційно-технологічних та цифрових моделей формалізованого управління процесами оцінки технічного стану конструкцій мостів в складі проєктів їх наступного відновлення.

5. Створення комплексу прикладних програм та його впровадження в практику девелоперських проєктів будівництва, в частині оцінювання та верифікації рівня технічної надійності інженерних споруд та можливостей їх подальшої безпечної експлуатації.

Об’єкт дослідження – процеси організаційно-технологічного, цифрового та інформаційно-аналітичного забезпечення в проєктах відновлення будівель і споруд, включно з комплексом заходів оцінювання технічного стану та управління реконструкцією інженерних об’єктів.

Предмет дослідження – науково-методичні основи, цифрові, організаційно-технологічні моделі системи та інтелектуальні інформаційні системи, які інтегровано використовуються для підготовки та організації відновлювальних робіт будівель і споруд.

Методи дослідження. У роботі використано сукупність методів, що відображають її міждисциплінарний характер, відповідають змісту та рівню складності поставлених завдань. Теоретичну основу становлять методи системного аналізу, абстрагування, порівняльного та історико-логічного

узагальнення для дослідження еволюції цифрових технологій в оцінюванні технічного стану конструкцій. Для розроблення прикладних рішень застосовано методи інформаційного моделювання (BIM), машинного навчання, комп'ютерного зору, сенсорного аналізу, а також методи математичного моделювання для прогнозування стану конструкцій. До складу загально-методичного підґрунтя роботи також включено елементи інженерного моделювання, експертного оцінювання, техніко-економічного аналізу, що дозволяє інтегрувати цифрові, технічні та організаційно-технологічні підходи до прийняття рішень у девелоперських проєктах. Емпіричну перевірку здійснено шляхом апробації розроблених моделей на прикладі мостових споруд інфраструктурного призначення. Застосовані методи є належно адаптованими до умов сучасної організації будівництва та забезпечення надійності об'єктів у рамках девелоперських проєктів, спрямованих на експлуатацію, відновлення та збереження технічної придатності мостів та інших інженерних споруд. Вони забезпечують інтеграцію цифрових рішень у процеси управління життєвим циклом об'єктів і сприяють впровадженню концепцій «розумної» експлуатації у будівельній галузі.

Наукова новизна полягає в оновленні науково-методичного базису та організаційно-технологічних моделей формалізованого опису здійснення оцінки технічного стану в складі девелоперських проєктів відновлення будівель і споруд. Здійснено суттєве вдосконалення мережевої організаційно-технологічної моделі для формалізованого опису ДПВ. Модель структуровано у вигляді «цифрового багатогранника», що комплексно охоплює всі стадії життєвого циклу такого проєкту і забезпечує можливість адаптивного та синергічного поєднання можливостей технічної діагностики та інтелектуальних інформаційних систем (ІС) – з науково-методичними та прикладними засадами цифровізації, організаційно-технологічного моделювання (формат «роботи-матриці»), будівельного девелопменту та організаційно-структурного інжинірингу. Оцінка технічного стану розглядається в роботі як невід'ємна

складова циклу будівельного девелоперського проєкту відновлення, що потребує врахування не лише технологічних параметрів, але й управлінських, вартісних та організаційних аспектів його реалізації.

Складовими наукової новизни дисертаційної роботи є наступні результати.

Удосконалено:

- *мережеву модель опису девелоперського проєкту відновлення мостових споруд* шляхом інтеграції властивостей цифрової, організаційно-технологічної та організаційно-управлінської моделі типу «роботи-матриці». Модель представлена у вигляді «цифрового багатогранника», що дає змогу формалізовано охопити всі стадії життєвого циклу проєкту та поєднати інструменти технічної діагностики й інтелектуальних інформаційних систем із методами цифровізації та організаційного інжинірингу. Її параметрична основа забезпечує унікальне поєднання технічних, ресурсних, організаційних і управлінських характеристик – від BIM-моделювання, кошторисів і ресурсних відомостей до оцінки компетенцій виконавців, їх цифрової зрілості, управлінської надійності та готовності до реалізації завдань. При цьому враховуються як внутрішні процесні показники, так і зовнішні чинники ризиків, інноваційності й ритмічності робіт, що підвищує системність і адаптивність управління відновленням інфраструктурних об'єктів;

- *організацію циклу комплексного оцінювання технічного стану конструкцій на основі інтеграції адаптивної сенсорної інфраструктури* та алгоритмічної обробки даних з використанням машинного навчання. На відміну від існуючих підходів, розроблено багатоетапний алгоритм прогнозування технічного стану мостових споруд, який охоплює: створення інформаційної моделі мосту в середовищі Revit; експорт параметрів за допомогою скриптів; обробку та структурування даних; формування матриці вхідних характеристик і оцінок; навчання моделей ШІ для точного прогнозування технічного стану;

- *підхід до інтеграції результатів оцінювання в BIM-середовище*, що забезпечує автоматизоване оновлення інформаційної моделі будівлі чи споруди відповідно до фактичного стану конструкцій. На відміну від існуючих підходів, запропоновано поєднання аналітичних етапів налаштування оптимізаційної моделі із багаторівневою нейронною мережею. Розроблену модель реалізовано в цифровому середовищі з можливістю інтеграції в системи управління інфраструктурою в проєкті ДПВ, що дозволило автоматизувати обробку нових даних, здійснювати контроль якості прогнозів у реальному часі та забезпечити адаптивне оновлення моделі.

Набули подальшого розвитку:

- *методика SHM (систем структурного моделювання) для оцінювання технічного стану будівельних конструкцій і споруд* в умовах експлуатації на основі потокових даних. На відміну від існуючих підходів, запропоновано прогностичні моделі технічного стану, що дають змогу здійснювати безперервний контроль параметрів об'єктів. Проведено критичний аналіз традиційних методів оцінювання стану мостів і будівельних конструкцій, які характеризуються трудомісткістю, тривалістю та високими ризиками для інспекторів. Доведено ефективність переходу від епізодичних інспекцій до системного оцінювання в режимі реального часу, що відповідає міжнародним практикам і є орієнтиром для вдосконалення української системи технічного нагляду;

- *методичні підходи до створення рекомендацій і технічних звітів про стан конструкцій* – на основі автоматизованого аналізу даних у реальному часі з використанням технологій штучного інтелекту для інфраструктурного оцінювання. На відміну від існуючих підходів, алгоритми машинного навчання та комп'ютерного зору дозволяють обробляти великі масиви інформації із сенсорів, відеоспостереження, дронів та BIM-моделей, оперативно виявляючи навіть незначні дефекти й ознаки зношення. Запропонований інтелектуальний підхід забезпечує адекватність оцінювання, мінімізує людський фактор,

підвищуючи своєчасність виявлення ризиків, що є ключовим для забезпечення надійності сучасної транспортної інфраструктури;

- *концептуальні засади цифрової інтерпретації результатів обстеження конструкцій з використанням інтелектуальних інтерфейсів візуалізації* – для прийняття організаційно-технологічних рішень на основі інтеграції інструментів штучного інтелекту та BIM-моделей. На відміну від існуючих підходів, запропоновано модель, яка забезпечує не лише точну оцінку поточного стану об'єктів, а й прогнозування пошкоджень, оптимізацію планування технічного обслуговування й ремонтних робіт. Це створює основу для впровадження автоматизованих систем підтримки рішень у сфері експлуатації та відновлення будівельних і транспортних споруд, що підвищує ефективність управління життєвим циклом інфраструктурних об'єктів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці та впровадженні організаційно-технологічного підходу до цифрового моніторингу та оцінювання технічного стану будівельних конструкцій (мостів) на основі інтелектуальних інформаційних систем. Запропонована система до можливостей традиційного оцінювання стану інженерних споруд додає переваги, що забезпечуються завдяки: сенсорному збору даних, алгоритмам штучного інтелекту (включаючи штучні нейронні мережі та методи нечіткої логіки); візуалізації у BIM-середовищі. Застосований набір інструментів та ІАС дозволяє реалізувати оперативний технічний нагляд, діагностику пошкоджень і прогнозування критичних змін у структурних елементах об'єктів. Практичне використання таких підходів забезпечує підвищення надійності та безпеки будівель, оптимізацію рішень з їх обстеження, ремонту та модернізації, а також зменшення витрат на експлуатацію інженерної інфраструктури.

Окремі результати дисертаційного дослідження «Організаційно-технологічне забезпечення моніторингу та оцінки технічного стану будівельних конструкцій з використанням інтелектуальних інформаційних систем» можуть бути інтегровані в освітній процес Київського національного університету

будівництва і архітектури під час підготовки бакалаврів і магістрів за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». Зокрема, положення дисертації доцільно використовувати при викладанні дисциплін «Організація і управління будівництвом», «Будівельна інформатика», «Цифрові технології в управлінні проєктами» та «Спецкурс випускаючої кафедри». Залучення розроблених методичних підходів до оцінювання технічного стану конструкцій із застосуванням вдосконалених цифрових, мережових моделей у поєднанні з інтелектуальними інформаційними технологіями, необхідними для прийняття рішень у сфері експлуатації, обстеження та управління життєвим циклом інженерних об'єктів в умовах цифрової трансформації галузі.

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному здобутті наукових і прикладних результатів, викладених у дисертації. У співавторських публікаціях використано виключно положення, що були отримані в межах власного наукового пошуку здобувача. Обсяг участі в колективних працях відображено у списку наукових праць.

Апробація. Результати дослідження та запропоновані інноваційні підходи були апробовані на міжнародних науково-практичних конференціях, перелік яких подано у списку праць.

Публікації. Основні науково-методичні інновації та прикладні результати дисертації висвітлено у 22 наукових публікаціях, серед яких: 2 колективні монографії; 9 статей у наукових збірниках і журналах, включених до категорії «Б» переліку фахових видань; 1 публікація в закордонному науковому журналі; а також 8 тез доповідей, представлених на міжнародних науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить анотацію українською та англійською мовами, список праць здобувача, вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел із 133 найменувань, додатки. Обсяг основного тексту дисертації складає 171 сторінка, включаючи 58 рисунків та 20 таблиць.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОРГАНІЗАЦІЇ В ПРОЄКТАХ ВІДНОВЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД В УМОВАХ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ

1.1. Систематизація сучасного стану та напрямів розвитку технологій й організації оцінювання технічного стану будівельних конструкцій

Мости є одним із найважливіших елементів сучасної інфраструктури, вони відіграють ключову роль у забезпеченні транспортного сполучення. Мости супроводжували людство протягом усієї його історії, з'єднуючи міста, регіони та країни, забезпечуючи мобільність людей і транспорту, тим самим сприяючи економічному розвитку. Перші мостові конструкції мали досить просту конструкцію і виготовлялися з доступних природних матеріалів – дерева, рослинних волокон, шкіри тварин, каменю. З часом, з розвитком техніки, люди почали використовувати залізо – чавун і сталь. Використання заліза як будівельного матеріалу стало можливим завдяки розвитку нових технологій обробки заліза. З появою в будівництві заліза були обґрунтовані, розраховані і впроваджені нові конструктивні схеми мостів, у тому числі великих прольотів. Також з'явився новий вид транспорту – залізниця, яка швидко стала панівним, а мостобудування стало як ніколи затребуваним.

Відкриття бетону зробило революцію в будівництві, зокрема мостобудуванні. Історія цього матеріалу сягає дуже давніх часів, коли давньоримський архітектор Вітрувій описав в'язучі матеріали на основі піску і вапняку та кам'яні матеріали як попередники бетону [1]. Сучасний бетон з'явився на початку 19 століття з початком виробництва цементу і швидко отримав широке застосування в будівництві [2]. Бетонні конструкції мали високу міцність на стиск, вогнестійкість, водонепроникність і довговічність. Однак вони погано витримували навантаження на розтяг, тому їх використання

було досить обмеженим [3]. Металеві конструкції в цьому відношенні більше підходять, оскільки вони однаково добре працюють як на стиск, так і на розтяг, тому було запропоновано поєднати переваги металу та бетону у вигляді нового будівельного матеріалу – залізобетону. Історія залізобетонних мостів починається з 1873 року, коли винахідник залізобетону француз Моньє отримав патент на залізобетонний міст. Міст його системи являв собою пролітну конструкцію у вигляді арки, затиснуту в масивних опорах. Пролітна будова і опори мали єдиний каркас у вигляді сітки з кількох шарів металевих прутів. У 1875 році у приватному парку у Франції за цією системою був побудований перший залізобетонний пішохідний міст довжиною 16 м і шириною 4 м [4].

Перші зразки залізобетонних мостів були відносно простими конструкціями, але їх ефективність швидко довела доцільність використання цього матеріалу в масштабному будівництві. Наприклад, міст у Віадані, Італія, побудований у 1891 році, став одним із перших успішних проектів такого типу [5]. Згодом розвиток технологій, зокрема вдосконалення складу бетону та методів армування, дозволило створювати більш амбітні та складні конструкції. Залізобетонні мости мають численні переваги, які роблять їх надзвичайно важливими для сучасного світу. Вони характеризуються високою міцністю, стійкістю до корозії, відносною простотою конструкції та економічністю. Крім того, завдяки здатності приймати будь-яку форму, бетон дозволяє втілювати сміливі архітектурні ідеї, створюючи не тільки функціональні, але й естетичні об'єкти.

У 1892 році француз Еннебік запропонував нову систему армування, що складається з поздовжньої арматури з поперечними обіймами, що забезпечило перехід до сучасних залізобетонних конструкцій [6]. Пізніше з'явилися також ребристі конструкції мостів, що сприяло подальшому розвитку арочних і балкових систем залізобетонних мостів. Залізобетонні балкові мости з'явилися в кінці XIX століття [7]. Прогонові будови повинні бути спочатку у вигляді плоских плит прольотом до 6 м з армуванням Моньє, а потім у вигляді

ребристих плит або балок прольотом до 15 м з армуванням Хеннебік. Незабаром у мостах почали застосовувати суцільні залізобетонні балки, що дозволяло перекривати прольоти до 40 м. Подальший розвиток залізобетонних мостів на початку 20 ст. пов'язаний із застосуванням консольних систем і наскрізних ферм. Набули поширення також мости каркасної системи.

Залізобетонні конструкції є найпоширенішим типом конструкції, у якій використовується комбінація бетону та арматурних матеріалів, як правило, сталі, для забезпечення підвищеної міцності та довговічності. Відповідно до звіту «Проектування та контроль бетонних сумішей» Асоціації портландцементу, бетон є найбільш широко використовуваним будівельним матеріалом у світі, щорічно виробляється приблизно 7,5 млрд м³ бетону.

Залізобетонні конструкції використовуються в широкому діапазоні застосувань, включаючи висотні будівлі, атомні електростанції, морські нафтогазові платформи, мости та іншу інфраструктуру. Згідно зі звітом Global Market Insights, у 2020 році світовий ринок залізобетону оцінювався у понад 45 мільярдів доларів США, і очікується, що він буде зростати з середньорічним темпом зростання приблизно на 5% з 2021 по 2027 рік [8]. Однак будівництво залізобетонних мостів також має свої труднощі. Проектування таких споруд вимагає врахування багатьох факторів, включаючи кліматичні умови, геологію місцевості та вплив на навколишнє середовище [9]. Крім того, технічне обслуговування та ремонт залізобетонних мостів є важливим для забезпечення їх довговічності.

За останні роки на дорогах України зросла інтенсивність руху та маса транспортних засобів, що більш суттєво впливає на всі складові дорожньої інфраструктури. Мости є одним із найважливіших елементів інфраструктури, що потребує уваги з боку державних органів та постійного фінансування для підтримки їх належного експлуатаційного стану. Велика кількість мостів побудована за технічними нормами, які не відповідають сучасним умовам руху за пропускною спроможністю та розмірами проїжджої частини.

Відповідно до Державного стандарту України «ДСТУ 9273:2024 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість», очікуваний термін служби мостів становить від 70 до 100 років залежно від типу конструкції [10]. Середній вік мостів становить 55 років, причому приблизно 12% з них старше 80 років. Отже, структурна цілісність цих мостів наближається до вичерпання [11].

Станом на 2019 рік на дорогах України експлуатується 28 397 мостів загальною протяжністю 818,2 км. Найбільшу кількість складають автомобільні мости – 19304 (67,98%), на другому місці залізничні мости – 7647 (26,93%), потім пішохідні мости – 1446 (5,09%). Автомобільні мости поділяються на мости, розташовані на дорогах загального користування – 79 % та на дорогах населених пунктів (комунальні мости) – 21 %. За довжиною мости можна розділити на малі – 49,7 %, середні – 44,2 % і великі – 6,1 %. Найбільш поширеними в Україні є залізобетонні мости – 91,5 %, з них близько 90 % – балкові. За типом конструкції прольотів в Україні найбільш поширені плитні прольоти – 52 % та ребристі – 43 %. Найбільша кількість мостів споруджується із збірного залізобетону – 65 %, монолітних – 30 %, збірно-монолітних – 5 %. Таким чином, можна констатувати, що найбільш поширеними в Україні є мости малої або середньої довжини, виготовлені із збірного залізобетону, балкові мости. Станом на 2019 рік обстежено близько 35% усіх мостів на дорогах загального користування, з них 13% потребують негайного капітального ремонту та реконструкції. Достовірної інформації щодо кількості обстежених комунальних мостів та даних про їх технічний стан немає [12, 13].

Зростає занепокоєння, що технічний стан мостів погіршуються внаслідок помилок проектування та будівництва, початкових дефектів матеріалів і конструкції, ерозії навколишнього середовища, збільшення навантажень, а також природних і антропогенних небезпек [14]. Крім того, через динамічну зміну навколишнього середовища та нелінійні фактори навантаження досить

важко оцінити конструктивні умови та встановити відповідні схеми технічного обслуговування навіть для одного мосту [15, 16]. Важливим завданням є отримання достовірної інформації про фактичний стан мостів, проведення бонітування мостів, виявлення споруд, які потребують термінового ремонту [17].

Деградація залізобетонних конструкцій означає погіршення або втрату структурної цілісності цих структур з плином часу через низку факторів. Деякі з поширених причин деградації залізобетонних конструкцій включають корозію арматурної сталі, хімічний вплив, фізичне пошкодження, пошкодження пожежею, фактори навколишнього середовища. Деградація залізобетонних конструкцій може викликати серйозне занепокоєння, оскільки це може поставити під загрозу безпеку та функціональність конструкції. Регулярні перевірки, діагностика стану, обслуговування та ремонт можуть допомогти пом'якшити наслідки деградації та продовжити термін служби конструкції. Для забезпечення довгострокової роботи залізобетонних конструкцій, важливо враховувати потенційні причини пошкодження та вживати відповідних заходів під час проектування, будівництва та обслуговування, щоб запобігти чи пом'якшити їх.

Метод причинно-наслідкових зв'язків може допомогти описати зв'язок між зовнішніми показниками пошкодження та причинами пошкодження конструкцій із залізобетону. Причинно-наслідкові зв'язки описують зв'язок між подіями або діями, де одна подія (причина) призводить до іншої події (наслідку). Причинно-наслідкові зв'язки можуть бути прямими або складними і можуть мати місце в широкому діапазоні контекстів, від фізики та техніки до соціальних наук та економіки. Виявлення причинно-наслідкових зв'язків може бути важливим для розуміння основних механізмів процесу, прогнозування результатів і прийняття обґрунтованих рішень. Виявивши причинно-наслідковий зв'язок між факторами, інженери можуть краще зрозуміти механізми, що лежать в основі погіршення стану залізобетонних конструкцій.

Наприклад, якщо візуальний огляд виявляє тріщини на поверхні залізобетонних конструкцій, можна дослідити причинно-наслідковий зв'язок, щоб визначити, які фактори могли сприяти розвитку цих тріщин. Можливі причини можуть включати такі фактори, як вплив погодних умов і умов навколишнього середовища, вплив хімічних речовин, недоліки конструкції або дефекти конструкції. Виявляючи причинно-наслідковий зв'язок між наявністю тріщин і основними факторами, які призвели до їх розвитку, інженери можуть розробити цілеспрямовані стратегії ремонту та технічного обслуговування, спрямовані на усунення першопричини проблеми.

Існує кілька методів діагностики стану залізобетонних конструкцій. Рисунок 1.1 показує деякі з найбільш використовуваних методів. Конкретний метод або комбінація методів, що використовуються для діагностики залізобетонних конструкцій, залежатиме від таких факторів, як розмір і складність конструкції, тяжкість будь-якого пошкодження та цілі діагностичного процесу.

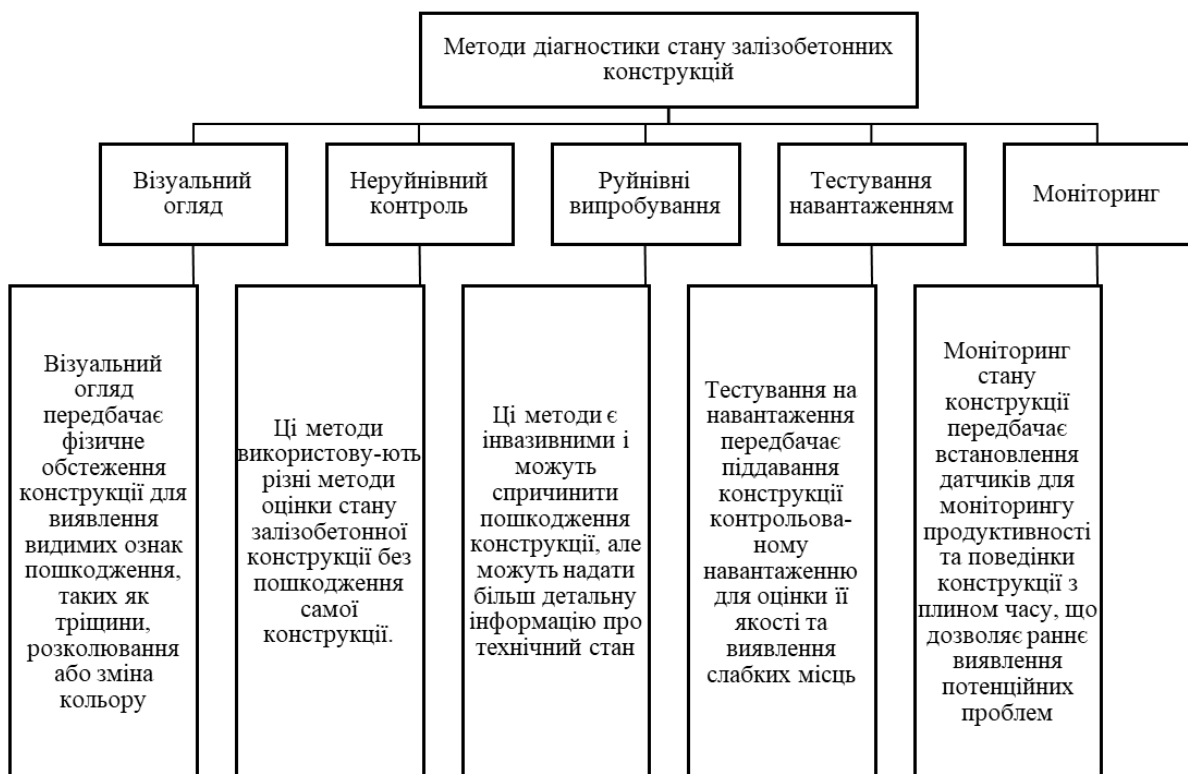


Рис. 1.1. Найбільш поширені методи діагностики стану залізо-бетонних конструкцій. Джерело: розроблено автором

Візуальний огляд є основним методом діагностики стану залізо-бетонних конструкцій, який передбачає фізичний огляд конструкції для виявлення видимих ознак пошкодження або зносу. Під час візуального огляду кваліфікований інспектор уважно огляне зовнішню та внутрішню частину конструкції, шукаючи будь-які ознаки пошкодження, такі як тріщини, розколювання або зміна кольору. На основі отриманої інформації можна досліджувати причинно-наслідкові зв'язки.

В Україні розроблено та використовується ДСТУ 9273:2024 «Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість». Цей Стандарт встановлює залежності між дефектами та пошкодженнями та можливими причинами їх виникнення. Причинами деградації вважаються корозія арматури (чотири зовнішні індикатори), перевантаження конструкцій (п'ять зовнішніх індикаторів), механічний вплив (два зовнішні індикатори) [10, 18].

Ще однією глобальною та актуальною проблемою мостової галузі в Україні є необхідність розвитку єдиної системи управління, яка б уніфікувала базу знань щодо стану та характеристик усіх існуючих мостів [19]. Роль систем управління мостами полягає в моніторингу, діагностиці та прогнозуванні технічного стану споруд та плануванні оптимального обслуговування мостів [12]. Зібрані дані аналізуються, перевіряються та інтегруються в централізовану базу даних [20]. Це дозволяє ефективно відстежувати та керувати інформацією про інспекції, технічне обслуговування та оцінку конструкції мостів [21]. Крім того, системи управління мостами важливі при прийнятті рішень про можливу модернізацію мостів [22, 24]. Наприклад, Rokneddin et al. досліджували сучасну сейсмічну надійність застарілих мостів у мережах автомобільних доріг, оцінену за допомогою залежного від часу аналізу сейсмічної крихкості типових класів мостів [23].

На даний час в Україні працює програмний комплекс «Аналітична експертна система управління мостами» (AESBM), який функціонує як база

даних і містить дані обстеження стану мостів на дорогах загального користування [25, 26]. База даних AESBM містить близько 150 технічних параметрів для кожного мосту та зберігає детальну інформацію про окремі компоненти мостів, такі як верхні конструкції, опори та фундаменти. Паспорт кожного мосту містить фотографії загального вигляду, проїзної частини, основних вузлів і дефектів. Водночас великою проблемою бази даних є відсутність технічного стану мостів, розташованих на дорогах населених пунктів (комунальних мостів) [27].

Створення, наповнення та супровід національної системи управління мостами дозволить:

- проводити паспортизацію мостів, яка повинна містити дані про технічний стан конструкцій, їх несучу здатність, відомості про ремонти та виявлені дефекти;
- здійснювати регулярний нагляд та оцінку технічного стану мосту;
- спрогнозувати технічний стан мосту та розробити рекомендації, які сприятимуть продовженню терміну служби споруди.

Початковим етапом, який забезпечує наповнення бази інформацією, є обстеження мостів, яке потребує величезних зусиль, багато часу та величезних фінансових витрат. Зараз велика кількість інформації про технічний стан елементів мосту зберігається в паперовому вигляді, що ускладнює перетворення в дані та отримання знань, необхідних для прийняття рішень. У зв'язку з цим зацікавлені сторони спрямовують зусилля на розробку та впровадження сучасних цифрових інструментів, які можна використовувати для швидкої та якісної оцінки технічного стану компонентів мосту. Дані, отримані на основі кількісної оцінки, можуть бути використані для прийняття рішень на етапі експлуатації мостів.

Як правило, дані збираються на різних етапах життєвого циклу моста (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Дані, зібрані на різних етапах життєвого циклу мосту.

Джерело: розроблено автором

Система керування мостами (СКМ) – це комплексний підхід до управління мостами на всіх етапах їх життєвого циклу: від проектування та будівництва до експлуатації й обслуговування [28]. В умовах обмежених бюджетів органи, відповідальні за інфраструктуру, у всьому світі стикаються з викликами щодо ефективного управління мостами та зростаючих вимог до їхнього технічного обслуговування. Система СКМ допомагає цим органам забезпечувати відповідний рівень безпеки та обслуговування інфраструктури, зокрема шляхом створення баз даних інвентаризації та інспекцій, а також системного планування ремонтних робіт, технічного обслуговування й відновлення. Таким чином, СКМ дозволяє оптимізувати розподіл фінансових ресурсів і підвищити безпеку як об'єктів інфраструктури, так і їхніх користувачів.

Системи керування мостами були створені для того, щоб допомогти особам, які приймають рішення, максимально ефективно забезпечувати безпеку, зручність та функціональність інфраструктури в межах наявного бюджету. Існує чотири основні компоненти СКМ, які охоплюють весь життєвий цикл моста. До них належать: інвентаризація активів, перевірка/моніторинг, оцінка ефективності та прийняття рішень. Усі ці компоненти (рис. 1.3) об'єднані навколо концепції життєвого циклу об'єкта і сприяють ефективному управлінню продуктивністю мосту протягом усього терміну його експлуатації.

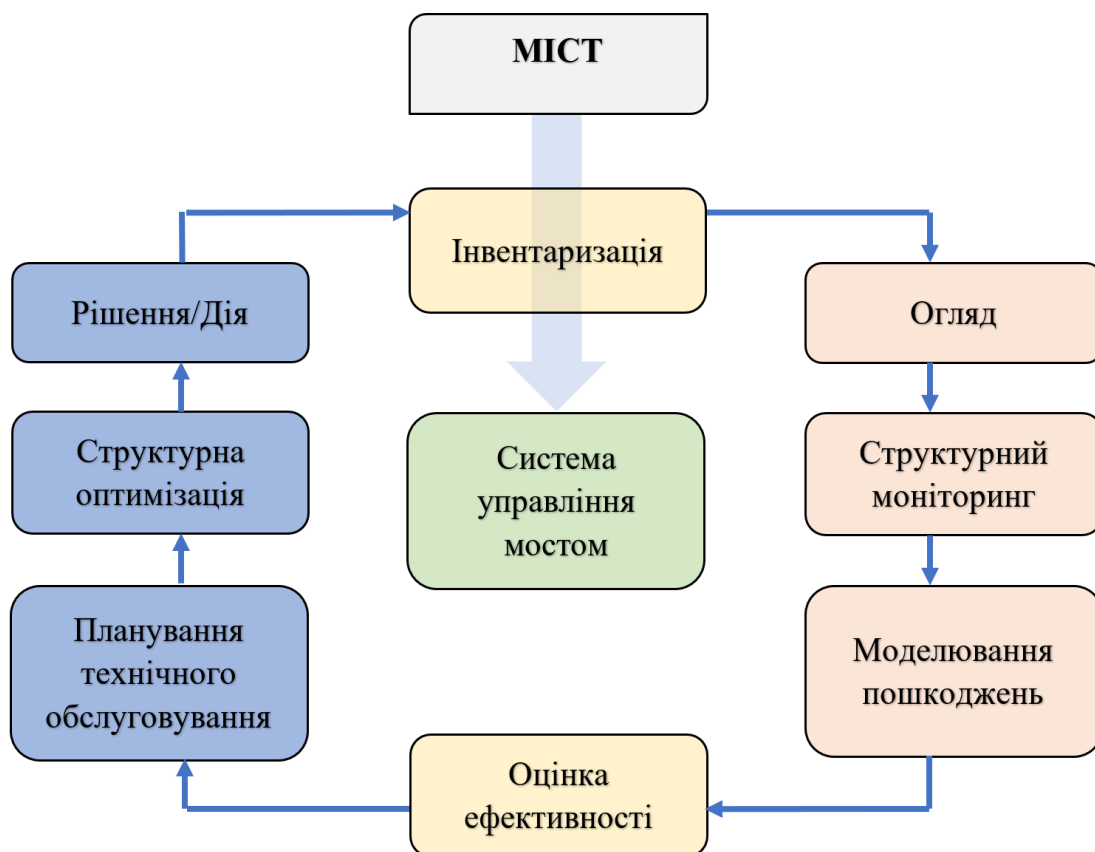


Рис. 1.3. Життєвий цикл системи керування мостами.

Джерело: розроблено автором

Архітектура типової СКМ складається з наступних модулів:

Модуль бази знань – відповідає за роботу з базою даних системи. Збір, введення та збереження даних є ключовими аспектами управління й обслуговування мостів. Якість збору даних безпосередньо впливає на загальну ефективність системи, тому створенню та підтримці бази даних слід приділяти особливу увагу.

База даних СКМ включає три основні компоненти:

1. Основна інформація та дані про геометрію і конструкцію мосту;
2. Бізнес-дані для технічного обслуговування та управління, зокрема записи про регулярні перевірки, обстеження, технічне обслуговування та оцінювання стану;
3. Дані геоінформаційної системи (ГІС), які використовуються для візуалізації просторової інформації про мости.

Модуль проектування підсистеми керування базою даних мосту – основний елемент СКМ, що складається з п'яти підмодулів: інформаційна картка мосту, записи результатів ручного огляду, дані моніторингу стану, записи про технічне обслуговування та керування інженерною документацією. Ці підмодулі забезпечують функції введення та обробки даних, формування запитів, статистичного аналізу та звітності.

Модулі керування системою – включають компоненти прогнозування зносу, розрахунку вартості життєвого циклу та оптимізації технічного обслуговування. До функціоналу також входить керування користувачами, привілеями, типами доступу, резервне копіювання та відновлення даних. Цей модуль реалізує політику безпеки з метою захисту та збереження даних СКМ.

СКМ зберігає дані інвентаризації та оцінки. Модуль оцінки стану визначає поточний технічний стан мосту, тоді як модуль прогнозування зносу оцінює майбутній стан його елементів [29]. Модуль життєвого циклу розраховує витрати як для експлуатуючих органів, так і для користувачів залежно від обраних варіантів технічного обслуговування. Модуль оптимізації визначає найбільш економічно ефективні стратегії обслуговування.

СКМ враховує специфічні вимоги різних відділів, що мають унікальні потреби. Вона включає інтегровані операційні модулі, зокрема: керування базою даних мостів, системне адміністрування, підсистему інтегрованої оцінки та прогнозування, а також допоміжну підсистему прийняття рішень [30]. Хоча модулі функціонують незалежно, вони взаємодіють через єдиний код ідентифікації (наприклад, номер мосту), що дозволяє забезпечити цілісну роботу системи та зручний перехід між модулями.

Численні країни, зокрема Фінляндія, Данія, Німеччина, Китай та Японія, виділили значні ресурси та доклали зусиль для розвитку ефективних систем керування мостами. У Китаї комплексна СКМ відіграє ключову роль, забезпечуючи контроль за фундаментальними даними щодо мостів на автомагістралях, організовуючи регулярні перевірки та надаючи технічну підтримку з обслуговування [31]. Попри очевидний прогрес, застосування таких систем стикається з низкою проблем. Однією з основних є фрагментованість та ізолюваність інформації, що зберігається в системі. Крім того, існують труднощі з візуалізацією даних, оскільки інформація про технічне обслуговування часто не пов'язана безпосередньо з цифровою моделлю мосту, що ускладнює її використання. Також поточна структура системи перешкоджає ефективній взаємодії між інженерами та менеджерами, що підкреслює необхідність у кращій інтеграції та зручніших інтерфейсах для користувачів СКМ.

Іншим прикладом, що може використовуватися на рівні з системами СКМ є так званий структурний моніторинг стану мостових конструкцій (рис. 1.4). Структурний моніторинг стану мостових конструкцій (SHM) застосовується для спостереження та оцінки поточного стану об'єктів цивільної інфраструктури. Ця технологія активно розвивається з метою контролю безпеки, працездатності та надійності існуючих споруд, таких як мости [34, 36, 38].



Рис. 1.4. Візуалізація технології структурний моніторинг стану мостових конструкцій (SHM). Джерело: розроблено автором

Традиційна оцінка стану мосту передбачає ручну перевірку стану та продуктивності споруди, яку зазвичай виконують інженери та інспектори шляхом фізичного огляду, проведення вимірювань і спостережень. Такий тип перевірки є критично важливою складовою систем управління мостами та дозволяє отримати цінну інформацію про поточний технічний стан конструкції, її елементів, а також про вплив навколишнього середовища та експлуатації протягом тривалого часу. Традиційна оцінка технічного стану вважається основним джерелом інформації для обстеження мосту, оскільки вона забезпечує всебічне розуміння актуального стану конструкції та її складових. Під час фізичного обстеження моста інженери та інспектори можуть зібрати важливі дані щодо впливу зовнішніх факторів, інтенсивності використання та часу на конструкцію, а також виявити потенційні проблеми й небезпеки. Ця інформація є вирішальною для прийняття обґрунтованих рішень стосовно технічного обслуговування, ремонту чи відновлення мосту.

Окрім задач поточного обслуговування та ремонту, така система також сприяє розробці довгострокових планів управління мостовою інфраструктурою. Традиційні перевірки зазвичай охоплюють такі аспекти [16, 32]:

1. Конструктивні елементи: перевіряються на наявність тріщин, корозії, пошкоджень бетонних і сталевих частин.
2. Надбудова: оглядаються палуба, балки та інші структурні компоненти для визначення їхнього технічного стану та потреби в ремонті або заміні.
3. Основна конструкція: досліджуються фундаменти та опори на предмет осідання, розтріскування та інших дефектів.
4. Підшипники та компенсаційні шви: перевіряється їхній стан, оскільки вони забезпечують можливість руху мосту та компенсацію деформацій, спричинених температурними змінами та іншими чинниками.
5. Дренаж: оглядається система водовідведення, зокрема жолоби та водостічні труби, щоб запобігти пошкодженню мосту водою.

Крім виявлення проблем та планування технічного обслуговування, традиційні перевірки також надають цінні історичні дані щодо зміни стану та продуктивності мосту з часом. Ця інформація може бути використана для розробки стратегічного плану управління мостом, що враховує очікувану ефективність його функціонування та потребу в подальших ремонтних або відновлювальних роботах [33].

Хоча традиційні перевірки технічного стану мостів надають цінну інформацію, вони також мають низку недоліків, які можуть обмежувати їхню ефективність:

1. Такі перевірки є трудомісткими та займають багато часу, особливо у випадку великих або складних мостових конструкцій, оскільки передбачають фізичне обстеження всієї споруди.
2. Їхня точність може залежати від суб'єктивного сприйняття інспектора та обмежень ручних вимірювань, що призводить до неузгодженостей і можливих помилок в оцінці стану мосту.

3. Проведення таких інспекцій може бути небезпечним для інспекторів, оскільки часто передбачає роботу в складних, важкодоступних або аварійних зонах конструкції.

4. Традиційні перевірки можуть не охоплювати всі ділянки мосту, особливо приховані або важкодоступні, що може призвести до неповної або неточної оцінки технічного стану.

5. Такі перевірки можуть бути дорогими через потребу у великій кількості персоналу та обладнання, а також необхідність використання спеціалізованих інструментів.

З метою подолання цих обмежень, багато сучасних систем контролю мостів інтегрують додаткові методи та технології, зокрема неруйнівний контроль і дистанційне зондування. Це дозволяє доповнити традиційні перевірки та забезпечити більш повне і точне розуміння технічного стану конструкції.

Системи SHM сприяють виявленню дефектів і пошкоджень, спричинених старінням матеріалів і зниженням експлуатаційних характеристик конструкцій. Причинами цього можуть бути екологічні фактори, помилки проектування, низька якість будівництва, відсутність належного обслуговування, а також стихійні лиха, зокрема землетруси, повені або сильні вітри. Зростаючий рівень зношення інфраструктури зумовлює необхідність проведення структурної оцінки з метою приведення конструкцій у відповідність до сучасних проєктних вимог.

Системи SHM зазнали значного розвитку порівняно з традиційними методами моніторингу, які здебільшого базувалися на прямому вимірюванні реакції конструкції за допомогою класичних датчиків, встановлених на мосту [35]. Звичайні підходи передбачали візуальну оцінку стану конструкції або використання простих портативних приладів, як-от ручні датчики. Однак ці методи мають низку обмежень: вони суттєво залежать від людського фактора, що призводить до тривалості процесу, високих трудозатрат, ризику помилок і

складностей у кількісній обробці отриманих даних. Крім того, їм бракує можливостей для комплексної та детальної оцінки пошкоджень мостів.

З огляду на ці недоліки, традиційні методи поступово замінюються сучасними високоточними цифровими системами, які використовують такі інструменти, як електропровідні тензодатчики, волоконно-оптичні сенсори, акселерометри, п'єзоелектричні перетворювачі та датчики рівня рідини. Ці пристрої забезпечують точний і оперативний моніторинг стану конструкції. Втім, навіть системи з такими інструментами мають певні обмеження, зокрема у сфері обробки великих обсягів даних та візуалізації структурних дефектів у режимі реального часу у 3D-форматі.

1.2. Потенціал функціонально-технологічної адаптації концепцій і засобів інтелектуальних інформаційних систем до процесів діагностики та аналізу технічного стану інженерних споруд (на прикладі мостів)

Перш ніж переходити до опису конкретних алгоритмів, що належать до галузі штучного інтелекту (ШІ), важливо систематизувати пов'язані з ним поняття. У цьому контексті необхідно визначити поняття інтелекту та штучного інтелекту на перетині психології та технічних наук. Це визначення слід зіставити з еволюцією штучного інтелекту – від його перших концепцій до сучасності.

Латинське слово *intelligo*, від якого походить сучасний термін інтелект, означає «я розумію» або «я сприймаю», а його буквальний переклад, пов'язаний із первісною етимологією (поєднання слів *inter* і *lego*), – «я читаю між» або «я вибираю між». Однак спочатку цей термін не був близьким до свого сучасного значення і тривалий час залишався тісно пов'язаним із теологічними науками, а пізніше – з філософією. Лише у XIX столітті, завдяки працям Джона Стюарта Мілля та Альфреда Біне у сфері психології, його було адаптовано до психологічних наук, і його значення почало наближатися до сучасного [37].

Попри це, навіть через понад сто років після введення поняття інтелекту до психологічної науки, його загальне визначення залишається суперечливим, а наукова спільнота, що його досліджує, – розділеною.

Проблема чіткого визначення штучного інтелекту виникає не лише через відмінності в рівні складності технологій, а й через сприйняття самого поняття інтелекту. Без надійного стандарту для вимірювання людського інтелекту дуже важко визначити конкретну систему та стверджувати, що вона поводить себе розумно. Однак можна стверджувати, що інформаційні системи, засновані на інтелекті, здатні пояснювати свої міркування або виправдовувати свою поведінку. Згідно з Роузом [39], фундаментальною особливістю штучного інтелекту є здатність машини імітувати інтелектуальну поведінку людини. Важливо, що інтелектуальні комп'ютерні системи здатні самостійно виконувати різні завдання та приймати рішення без участі людини. Штучний інтелект – це інтерактивна, автономна та самонавчальна система, здатна виконувати когнітивні функції [40]. Це включає створення алгоритмів і систем, здатних до міркування, прийняття рішень, аналізу природної мови та сприйняття навколишнього світу.

Завдяки своїй універсальності штучний інтелект можна поділити на три основні категорії:

1. Слабкий (ANI), який є цілеспрямованим і спеціалізованим на виконанні завдань одного класу
2. Сильний (AGI), здатний розуміти, навчатися та застосовувати знання до різноманітних інтелектуальних завдань, подібно до когнітивних здібностей людини.
3. Суперінтелект (ASI), що досягається, коли обсяг програмного забезпечення значно перевищує рівень людського інтелекту. Цей гіпотетичний тип штучного інтелекту має розвинуті когнітивні функції та навички мислення, що значно перевершують здібності будь-якої людини. Згідно з Бостромом [41], суперінтелект можна визначити як інтелектуальні здібності, що перевершують

найвищі здібності людського розуму в кожній галузі, зокрема наука, мистецтво, вирішення проблем, командування та сприйняття власного інтелекту.

На відміну від вузьких або спеціалізованих систем, загальний штучний інтелект здатний адаптуватися і виконувати завдання, які ще не були явно для нього запрограмовані, подібно до людського інтелекту. ЗШІ прагне імітувати людський інтелект і призначений не лише для виконання конкретних завдань, а й для розуміння світу так, як це робить людина, навчання на досвіді, прийняття раціональних рішень та демонстрації гнучкості в різних ситуаціях. Одна з цілей загального штучного інтелекту – створення систем, здатних працювати з широким спектром завдань та областей, без необхідності спеціалізуватися в одній галузі.

Інший поділ штучного інтелекту ґрунтується на функціональних можливостях і розрізняє [47, 49, 51, 53]:

1. Реактивні машини. Це системи штучного інтелекту, які реагують на навколишнє середовище на основі поточних подразників. Вони не мають внутрішньої моделі світу і не здатні передбачати майбутні події. Їхні дії базуються виключно на прямих реакціях на поточні подразники.

2. Обмежена пам'ять, яка характеризує машини, здатні запам'ятовувати інформацію протягом короткого періоду часу. Ці системи можуть приймати рішення на основі наявних у них даних, але не здатні зберігати інформацію тривалий час.

3. Теорія розуму, що означає здатність машин розуміти та передбачати поведінку інших сутностей на основі внутрішньої моделі свого розуму. Вони можуть співпереживати і розуміти наміри та психічні стани інших істот.

4. Самосвідомість, яка викликає багато суперечок. Згідно з визначенням, самосвідомі машини усвідомлюють своє існування, мають здатність розмірковувати над власними думками та діями, а також розуміють свою роль у навколишньому середовищі. Вони мають внутрішню усвідомленість і здатність до саморозвитку.

Всі вищеописані типи штучного інтелекту представлені на рис. 1.5.

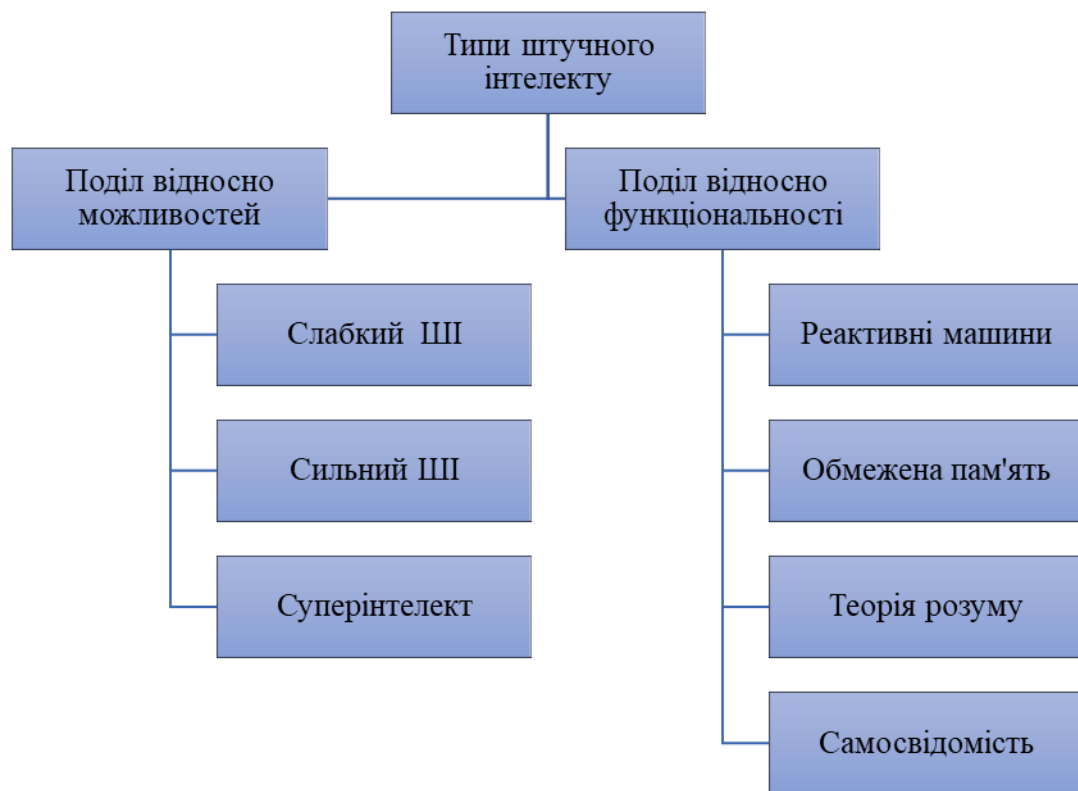


Рис. 1.5. Види штучного інтелекту. Джерело: розроблено автором

Машинне навчання, невід'ємна частина штучного інтелекту, відіграє ключову роль у технологічній трансформації XXI століття. Такий підхід до програмування комп'ютерів дозволяє їм навчатися на основі даних та досвіду, а не покладатися на чітко визначені інструкції. Згідно з визначенням, Бішоп [42], машинне навчання можна визначити як галузь штучного інтелекту, яка дозволяє системам отримувати знання без явного програмування. Існує безліч методів у галузі машинного навчання, включаючи нейронні мережі, дерева рішень та методи опорних векторів. Машинне навчання зосереджується на виявленні закономірностей та прогнозного моделюванні. Завдяки своїй здатності навчатися на великих наборах даних і автоматизувати процеси, воно стало незамінним інструментом для вирішення проблем у сучасному світі, керованому даними [56, 58]. Машинне навчання знаходить застосування в

різних галузях, зокрема в медицині, фінансах, продажах та маркетингу. Його використовують у пошукових системах, фільтрах спаму, системах рекомендацій, розміщенні реклами, торгівлі акціями, аналізі кредитної історії, виявленні шахрайства та багатьох інших сферах. У сфері навчальних систем існує багато різних типів алгоритмів, таких як навчання з учителем, без учителя, напівнавчене навчання та навчання з підкріпленням. Крім того, глибоке навчання, яке є частиною ширшої родини методів машинного навчання, здатне інтелектуально аналізувати дані у великих масштабах.

Основні типи алгоритмів навчання з розширеними характеристиками представлені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1

Основні типи алгоритмів машинного навчання

Характеристика	Кероване навчання (Supervised learning)	Самостійне навчання (Unsupervised learning)	Навчання з підкріпленням (Reinforcement learning)
1	2	3	4
Визначення	Найпоширеніший тип машинного навчання. Він базується на асоціюванні вхідних даних з відповідними мітками, що дозволяє навчати модель	Самостійне навчання має справу з нерозміченими даними. Це дозволяє виявити приховані закономірності, структури та кореляції	Цей процес найбільше нагадує навчання людини, оскільки ґрунтується на методі спроб і помилок. Алгоритми навчання з підкріпленням використовують механізм винагороди та покарання
Спосіб навчання	Модель навчається, зменшуючи різницю між прогнозованими та фактичними мітками та зіставляючи вхідні ознаки з цільовими мітками	Цей метод використовує методи кластеризації, зменшення розмірності або оцінки щільності. Модель навчається розпізнавати приховані структури даних без використання конкретних цільових міток	У навчанні з підкріпленням агент оптимізує свою стратегію дій через контакт із середовищем. Коригує свою поведінку залежно від отриманих винагород та покарань

1	2	3	4
Мета	Метою є прогнозування міток для невідомих даних та відтворення вивченої схеми	Мета полягає в тому, щоб зробити висновки, згрупувати пов'язані дані та знайти приховані закономірності	Мета процесу навчання полягає у встановленні набору правил, які визначають найкращі дії, які система може виконати, максимізуючи отримані винагороди
Доступність даних	У процесі навчання з учителем позначені навчальні дані разом з відповідною цільовою міткою є важливими	Він може працювати з даними, які не мають міток або містять лише вхідні атрибути	У навчанні з підкріпленням готується середовище, з якого модель автоматично збирає дані
Приклади алгоритмів	- лінійна регресія, - поліноміальна регресія, - дерево регресії, - нейронні мережі, - дерева рішень, - метод k-найближчих сусідів	- метод k-середніх, - ієрархічний кластерний аналіз, - DBSCAN (просторова кластеризація застосунків з шумом на основі щільності), - однокласова машина опорних векторів	- Q-навчання, - алгоритми градієнтного посилення, - глибокі Q-мережі
Застосування	У фінансах ці алгоритми можна використовувати для аналізу кредитоспроможності. Моделі використовуються в управлінні електронною поштою, точніше у вигляді спам-фільтра. Прикладом регресії може бути прогнозування вартості автомобіля на основі його моделі, марки або об'єму двигуна	У продажах та маркетингу ці алгоритми використовуються для сегментації груп клієнтів та визначення їхніх характеристик. У медицині їх використовують для діагностики захворювань на ранній стадії розвитку. Прикладом використання може бути визначення груп схожих користувачів, які здійснюють покупки в інтернет-магазині або відвідують новинний веб-сайт	У продажах та маркетингу навчання з підкріпленням використовується для рекомендації продуктів та послуг. Його також можна використовувати для навчання автономних транспортних засобів та обробки природної мови. Ці моделі використовуються в навігації, де процес вибору маршруту враховує інформацію про інтенсивність руху, зіткнення та дорожні роботи

Важливою частиною розширеної родини машинного навчання є нейронні мережі, які являють собою тип математичних моделей, натхнених роботою людського мозку. Вони знаходять широке застосування в галузях машинного навчання та штучного інтелекту. Нейронні мережі складаються з взаємопов'язаних штучних нейронів, які обробляють вхідні дані та ефективно вирішують складні проблеми, такі як класифікація, розпізнавання образів або прогнозування. Ці мережі покращують здатність машини до навчання, нашаровуючи вузли, подібно до того, як нейрони розташовані в людському мозку, що дозволяє кожному вузлу підключатися до багатьох інших вузлів у мережі. У штучній нейронній мережі вузли розташовані у три шари: вхідний, прихований та вихідний.

Наразі існує багато різних архітектур нейронних мереж, зокрема нейронні мережі прямого зв'язку, рекурентні нейронні мережі та згорткові нейронні мережі. Кожна з цих архітектур має свої унікальні застосування та переваги, що робить нейронні мережі універсальним інструментом у галузі машинного навчання. Вони здатні ефективно обробляти різноманітні типи даних і розв'язувати конкретні проблеми. Наприклад, рекурентні мережі добре підходять для аналізу послідовних даних, таких як текст або часові ряди, тоді як згорткові мережі виявляються дуже ефективними для обробки зображень.

Дослідження, спрямовані на вдосконалення процесу навчання та оптимізації нейронних мереж, тривають. Одним із ключових напрямків є розробка нових алгоритмів оптимізації, які дозволяють швидше та ефективніше навчати мережі, що особливо важливо при роботі з великими наборами даних. Динамічний розвиток нейронних мереж призводить до появи дедалі більш досконалих методів, зокрема тих, що дозволяють генерувати реалістичні дані, такі як зображення чи тексти, шляхом конкуренції між двома мережами: генеративною та дискримінативною. Важливим аспектом розробки нейронних мереж є етичні питання, зокрема забезпечення конфіденційності та уникнення упередженості. Врахування цих аспектів дозволить максимально використати

переваги штучного інтелекту, одночасно мінімізуючи ризики, пов'язані з його застосуванням.

Технічний прогрес та зростаючий інтерес з боку менеджерів, науковців та суспільства зробили практичне застосування штучного інтелекту дедалі популярнішим. Багато компаній інвестують значні ресурси, щоб скористатися перевагами технологій, що сприяють інноваціям у бізнес-моделях. Використання штучного інтелекту дозволяє підвищити ефективність та результативність процесів, що, у свою чергу, забезпечує більш ефективне управління організацією. Штучний інтелект можна успішно застосовувати в багатьох галузях промисловості. Найвищі показники використання спостерігаються в таких сферах, як передові технології та телекомунікації, автомобільна промисловість, фінансові послуги, а також енергетика та сировинні ресурси. Рішення на основі штучного інтелекту найшвидше впроваджуються в галузях з високим ступенем цифровізації.

Як зазначає Рейн [43], штучний інтелект може допомогти підвищити інноваційність організацій. Ключові переваги, які може принести впровадження інтелектуальних систем, включають економію часу, покращення якості продукції та послуг, а також підвищення ефективності процесів. McKinsey [44] у своєму звіті зазначає, що штучний інтелект може принести значні переваги, особливо у чотирьох елементах ланцюга створення вартості: ефективніші дослідження та розробки, більш ефективна маркетингова та збутова діяльність, оптимізація виробництва та покращення клієнтського досвіду.

Той факт, що машини здатні аналізувати і класифікувати величезні обсяги даних і вдосконалювати свої навички за допомогою навчання з учителем та без нього, справді вражає. Однак ще більше вражає, коли ці передові операції з даними застосовуються на практиці. Одним із найпрактичніших і найпомітніших застосувань штучного інтелекту є галузь робототехніки – використання машин для виконання фізичних завдань, таких як пакування коробок, складання виробів, фарбування автомобілів та пілососіння підлоги.

До нещодавнього часу робототехніка обмежувалася створенням спеціалізованих машин. На заводах, що виробляють автомобілі, використовуються машини для підйому автомобілів на складальній лінії, щоб люди могли встановлювати деталі. Хоча ці роботи були вражаючими, їхні можливості залишалися обмеженими. Навчання як повторюваним, так і небезпечним завданням вимагало втручання людини.

Як справедливо зазначив Курцвейл [45] майже 40 років тому, будь-який ретельний розгляд майбутнього ШІ має починатися з визначення того, ким він, ймовірно, не стане. Штучний інтелект – це не короткостроковий тренд, який швидко мине, – це майбутнє. Він є потужною силою, що трансформує повсякденні практики, особисті та професійні стосунки, а також навколишнє середовище.

Швидкий розвиток технологій, інноваційних алгоритмів, доступність великих наборів даних і постійне зростання обчислювальної потужності призводять до фундаментальних змін у багатьох галузях промисловості. Разом із розвитком штучного інтелекту змінюються також поведінка, очікування й можливості споживачів. Прийняття рішень у сучасних суспільствах, підживлюване великими обсягами даних і досягненнями ШІ, дедалі більше автоматизується.

Дослідження показують, що потенціал штучного інтелекту сприймається по-різному. Деякі аналітики вважають майбутнє технологій оптимістичним, тоді як інші оцінюють економічні вигоди від їхнього застосування з великою обережністю. Тривають також активні дебати щодо наслідків широкого впровадження інтелектуальних технологій. Противники наголошують, що передача передових систем широкій громадськості може призвести до серйозних наслідків, а безвідповідальність у їхньому використанні створює ризик навмисного або випадкового зловживання. Штучний інтелект може бути використаний для поширення дезінформації, маніпулювання людьми та навіть для скоєння кіберзлочинів. Окрім того, ШІ стикається з низкою викликів, серед

яких – інтерпретація моделей, етичні питання та добросовісне використання даних.

1.3. Концептуальні засади інженерно-цифрового моделювання систем оцінювання та управління технічним станом будівельних конструкцій

Нелегко сформулювати чітке визначення технології BIM, яке б безсумнівно охоплювало широку сферу її застосування. Далі представлено потрійне розширення аббревіатури BIM, яке створює три окремі, але взаємозалежні області, які називаються [46]:

- Інформаційне моделювання будівлі (Building Information Modelling);
- Інформаційна модель будівлі (Building Information Model);
- Управління інформацією про будівлю (Building Information Management).

Перший з них був сформульований як бізнес-процес, зосереджений на створенні, зборі та використанні інформації про будівельний об'єкт протягом кожної фази його життєвого циклу [64, 66]. Це гарантує, що дані є повністю актуальними, адекватними та доступними для всіх зацікавлених сторін, залучених до планування, впровадження та експлуатації об'єкта. Функціонування такої системи можливе, перш за все, завдяки використанню цифрових рішень та сумісності інструментів.

Отже, *інформаційне моделювання будівель* – це технологія створення та використання даних про будівлі для проектування, будівництва та експлуатації будівлі протягом її життєвого циклу. BIM дозволяє всім зацікавленим сторонам мати доступ до однієї й тієї ж інформації одночасно завдяки сумісності між технологічними платформами. В даному випадку, технологія являє собою механізм, який перетворює вхідні дані на вихідні, часто за наявності правил, що організовують цю обробку (рис. 1.6).

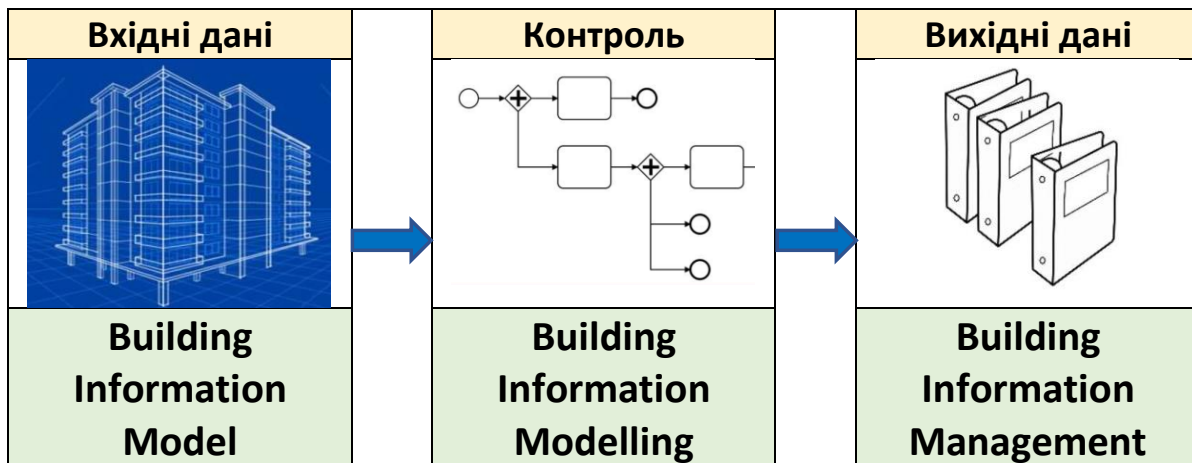


Рис. 1.6. BIM як технологія моделювання інформації про будівлі та споруди.

Джерело: розроблено автором

Таким чином, це елементарний компонент процесного підходу до управління більшою системою залежностей. Цей тип управління працює на відміну від функціонального підходу (також званого класичним або функціональним), який базується на замкнутій діяльності незалежно керованих центрів, орієнтованих на досягнення автономних цілей. За визначенням, функціональний підхід пов'язаний зі зниженням ефективності дій [48]. Це, перш за все, результат обмежень у потоку даних та взаємної конкуренції між окремими центрами, що входять до складу системи. Бізнес-процес працює в просторі з визначеними ролями для окремих учасників процесу. Він також складається з: архітектури, що визначає обсяг діяльності, та моделі, що представляє спосіб їх виконання. Сам бізнес-процес характеризується першістю загальної мети над окремими цілями. Усі дії пов'язані з чітко визначеним одержувачем, мірами, що визначають ступінь досягнення мети, та використанням ІТ-інструментів. Архітектура та модель бізнес-процесу зазвичай представлені за допомогою блок-схем або так званої нотації BPMN (нотація моделювання бізнес-процесів) – розробленої Групою управління об'єктами та що відображає більшість характерних особливостей бізнес-процесу. Такий тип презентації також знаходить своє місце в стандартах, безпосередньо пов'язаних

з методологією BIM. Особливо в розділі про Керівництво з надання інформації (IDM). Організація buildingSMART International, яка координує роботу над відкритим форматом для запису та обміну даними, називає BPMN похідною від більш загальної концепції карти процесу [50, 52]. Ключова інформація, що міститься в карті процесу, – це впорядкований потік дій у межах певної теми. Він поділений на частини, пов'язані з окремими учасниками процесу (так званими акторами), пов'язаними мережею каналів та залежностей. Додатково, місця перетину та обміну інформацією (вимоги обміну) розділяються, таким чином визначаючи пакети даних, необхідні для забезпечення безперебійного виконання завдання та їх повторного використання в інших частинах карти.

Друга область BIM, *Інформаційна модель будівлі* – це база вхідних даних, необхідних для організації та контролю всіх видів діяльності, що здійснюються в рамках проектування, будівництва та експлуатації об'єкта. Це цифрове зображення будівлі, динамічно спільно створене учасниками технологічного процесу та формує аспект візуалізації та моделювання BIM. Цифрове представлення будівлі є важливим елементом для реалізації описаного вище процесного підходу. По суті, це зосереджено на використанні інформації, зібраної в моделі, що дозволяє оптимізувати етапи проектування, будівництва та експлуатації.

Третя область BIM, *Управління інформацією про будівлю*, що безпосередньо перекладається як управління інформацією про будівлю, є основою для процесів прийняття рішень, які спрямовують усі подальші дії, пов'язані з нею. *Управління інформацією про будівлю* передбачає організацію та контроль бізнес-процесів через використання даних, що містяться в цифровому прототипі, з метою забезпечення обміну інформацією на всіх етапах життєвого циклу активу. Серед основних переваг такого підходу – централізована та наочна комунікація, можливість раннього аналізу варіантів, підтримка сталого розвитку, ефективне проєктування, інтеграція різних дисциплін, контроль на будівельному майданчику, ведення актуальної документації за фактом

реалізації проєкту. Усе це сприяє ефективному формуванню як самого процесу, так і моделі життєвого циклу об'єкта – від початкової ідеї до остаточного виведення з експлуатації.

Серед згаданих напрямків, що дозволяють оптимізувати традиційний підхід у будівельній інженерії, у вищенаведеному визначенні чітко згадується, серед іншого:

- комунікація між учасниками інвестиційно-будівельного процесу, зосереджена на цифровій моделі будівлі,
- раннє виявлення варіантів проєкту,
- ефективне проектування, включаючи інтеграцію галузей промисловості,
- контроль подальших, непроектних етапів життєвого циклу.

Усі дії, здійснені на основі аналізів, проведених у будівлі, повинні бути відображені в BIM-моделі, найчастіше у вигляді графічного або атрибутивного елемента, включаючи описовий. Завдяки такому визначеному підходу створюється замкнутий цикл залежностей між трьома областями BIM (рис. 1.7).

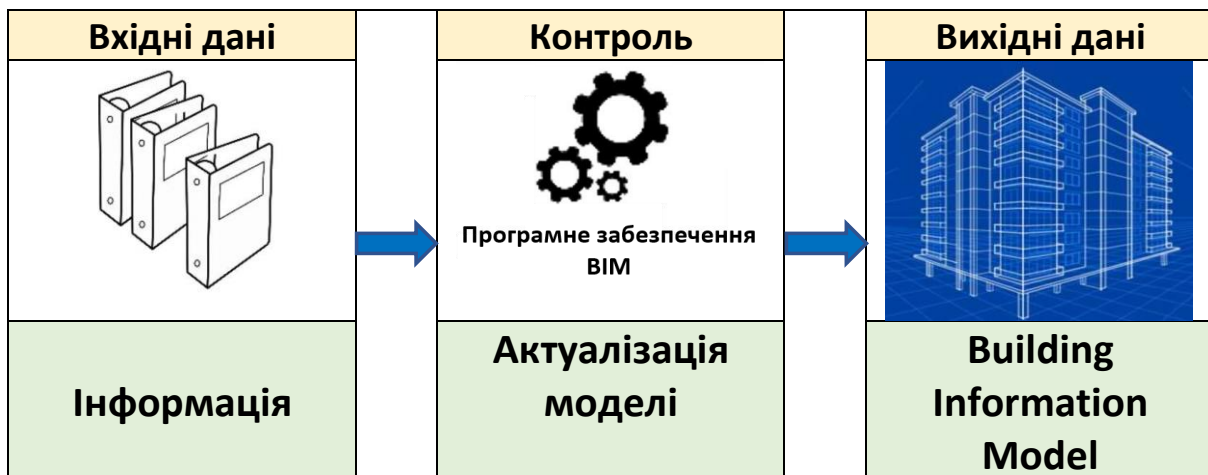


Рис. 1.7. Побудова та оновлення BIM-моделі з точки зору процесу.

Джерело: розроблено автором

Після того, як інформація передається з реального об'єкта в модель, концепцію цифрової моделі (ЦМ) можна розширити до концепції, яка функціонує в деяких галузях як так звана цифрова тінь (ЦТ). Коли вона стає не лише відображенням поточного стану будівлі, а й основою для прийнятих рішень як один із вузлів двостороннього зв'язку між реальністю та моделлю, вона починає безпосередньо функціонувати як цифровий двійник (ЦД). Окрім тризначної природи методології BIM, представленій тут, існує багато інших підходів, спрямованих на стисле вираження її суті [71, 73].

Спроба синтетичного узагальнення з посиланням на найчастіше цитовані та найточніші визначення здійснена в публікаціях, пов'язаних з бібліометричним аналізом BIM, розвитком цієї технології та її застосуванням у вибраних будівельних секторах. Лі та ін. [54], посиляючись на основну функцію BIM, представляють можливість інтеграції дисциплін, аналізу, моделювання та візуалізації геометричних та негеометричних даних про будівельний об'єкт. У роботі [55] наведено визначення BIM як інформаційної моделі будівлі, вказуючи роль 3D-моделі як одного з кількох методів представлення даних. BIM тут розглядається як продукт, так і процес, з особливим акцентом на їхньому використанні на етапі експлуатації будівлі (експлуатація та обслуговування). Розробка цих термінів була включена до першої версії Національного стандарту BIM, на основі якого поняття продукту може бути зведене до цифрового представлення будівельного об'єкта, створеного на основі певних правил (стандартів) та використовуваного як носій інформації (продукт).

Бредлі та ін. [57] виділяють чотири основні компоненти, що формують концепцію методології BIM: співпраця, представлення, процес та життєвий цикл, які, будучи взаємопов'язаними, створюють інноваційне та ефективне середовище проекту. Ці компоненти є результатом трьох визначень, згідно з якими, з одного боку, BIM можна розуміти як метод представлення будівельних даних, а з іншого – як процес або навіть «мистецтво» збору та

управління інформацією в життєвому циклі. Ораї та ін. [59] представляють пропозицію щодо відображення сутності BIM на основі концепцій інтегративної технології, яка є прямим розширенням процесу інтегрованого проектування. Інтегрований процес проектування складатиметься з параметричного інтелекту та цифрового представлення. Зрештою, вони визначають BIM як сукупність методів у галузі будівництва з елементами інформаційних технологій та економічних і управлінських наук. Подібний підхід представлений Сантосом [60], де BIM описується як методологія, зосереджена на двох ключових компонентах: співпраці та управлінні великими інформаційними ресурсами. Сформульовані таким чином визначення не стосуються безпосередньо 3D-моделі, а радше згадують цифрове представлення даних у більш загальному сенсі. У роботі [61] згадується багатовимірний аспект методології BIM, 3D-модель фігурує безпосередньо. Потім вона відіграє роль віртуальної моделі будівлі, а кожен наступний вимір (символічно позначений як nD) являє собою її продовження, що дозволяє вводити багатоаспектну будівельну інформацію, що генерується та аналізується протягом усього життєвого циклу будівлі. У публікації 4D-моделі згадуються як спосіб врахування часового виміру, а 5D – як складова витрат у процесі будівництва. Різниця та призначення 6D та 7D вимірів вже не такі чіткі, хоча, виходячи з досліджень, проведених авторами, переважають, відповідно, такі: використання моделі для екологічного аналізу та діяльності, пов'язаної з обслуговуванням об'єктів (FM). Такий поділ створює простір для визначення та розвитку додаткових вимірів, серед яких згадувалися етап знесення та пов'язане з ним управління відходами. Поширеною тенденцією, окрім окреслення семантичної концепції технології BIM, є цитування, часто апріорі, переваг, пов'язаних з процесним підходом у будівництві. Чжао [62] згадує, серед іншого: скорочення витрат та економію часу, зменшення кількості помилок та дублювання інформації, а також підвищення продуктивності на етапі проектування та впровадження. Однак вони не можуть бути безпосередньою частиною

визначення, а лише мірою ефективного впровадження. Безліч розширень терміну BIM пов'язана з абстрактним характером концепцій та міждисциплінарним характером питань, які виходять за межі функціонально відокремленої сфери діяльності учасників інвестиційного процесу, що проводився досі [82, 84, 86].

Дослідженнями першого розділу опрацьовано концептуально-теоретичні підходи до оцінки технічного стану будівель та споруд, в рамках проєктів відновлення (рис. 1.8), із переважним акцентом на мостові споруди як об'єкти критичної інфраструктури.

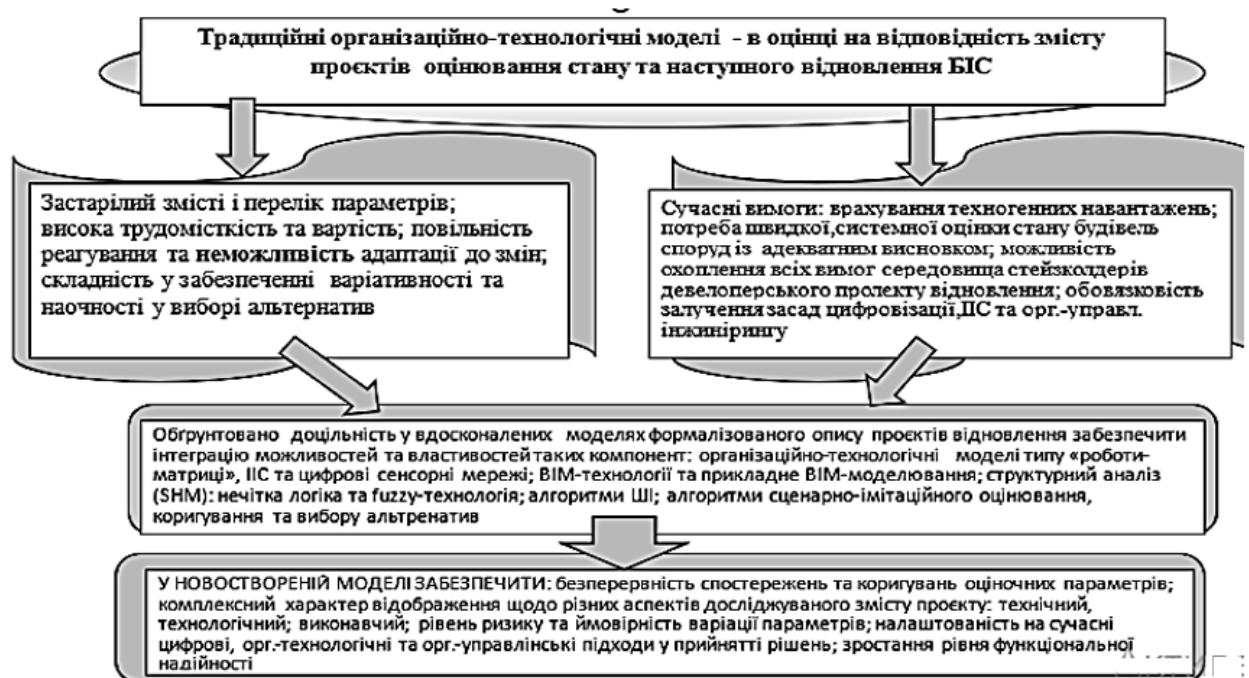


Рис. 1.8. Схема трансформації організаційно-технологічних моделей в умовах девелоперських проєктів відновлення для забезпечення адаптивного оцінювання технічного стану будівель і споруд. Джерело: розроблено автором

Обґрунтовано, що традиційно структуровані організаційно-технологічні моделі здебільшого зосереджені на відображенні тривалості й трудомісткості виконання робіт, але не охоплюють усього спектра факторів, що впливають на відновлювані процеси. Сучасні умови вимагають створення комбінованих за

призначенням та аналітичною конструкцією моделей, які б інтегрували властивості різних підходів – організаційно-технологічних (роботи-дуги, роботи-вершини, роботи-матриці), організаційно-управлінських, цифрових та інших. Такі моделі мають виконувати функцію не лише класичного планування, а й цифрового моделювання багаторівневої структури відновлювальних робіт. Лише інтеграція в єдину систему організаційно-технологічних, управлінських та цифрових складових здатна забезпечити адекватність моделей реальним завданням відновлення, підвищити їхню аналітичну глибину та адаптивність, що особливо важливо в умовах воєнного та повоєнного будівельного девелопменту. Отже, інтелектуальні інформаційні системи (ІС) набувають статусу невід’ємного елемента сучасних технологій реконструкції та відновлення інженерних споруд, їх застосування для потреб інженерних споруд охоплює повний цикл відновлювальних робіт.

Висновки до розділу 1.

1. В умовах сучасного будівництва, орієнтованого на відновлення інфраструктури, пріоритетним завданням є створення науково-прикладного інструментарію, що поєднує організаційно-технологічне моделювання та принципи будівельного девелопменту з інтелектуальними інформаційними системами. Такий підхід дозволяє здійснювати комплексну оцінку технічного стану споруд із урахуванням інженерних параметрів, експлуатаційних умов, часових і безпекових обмежень, а також готовності девелоперського середовища до реалізації проєктів. Недоліки традиційних методів реконструкції, зумовлені низьким рівнем цифровізації, актуалізують необхідність застосування BIM-технологій, штучного інтелекту та сенсорної аналітики. Дослідження спрямоване на розроблення комбінованих організаційно-технологічних моделей типу «роботи–дуги», «роботи–вершини», «роботи–матриці», здатних не лише забезпечувати планування, а й цифрове відтворення багаторівневої структури відновлювальних процесів, інтегруючи

технологічні, управлінські та ресурсні рішення для підвищення ефективності девелоперських проєктів.

2. Досліджено сучасний етап розвитку інженерної діагностики та отримано висновок, що останнім часом спостерігається активна інтеграція сенсорних систем, цифрових технологій та штучного інтелекту в процеси моніторингу технічного стану мостів. Традиційні методи візуального обстеження поступово доповнюються або замінюються автоматизованими системами збору, передачі й аналізу даних, що підвищує об'єктивність і своєчасність виявлення пошкоджень. Особливо ефективними є мультисенсорні системи, які забезпечують безперервне спостереження за деформаціями, вібраціями, температурними коливаннями та іншими параметрами. Це створює передумови для переходу від реактивного до превентивного обслуговування інфраструктури.

3. Опрацьовано історичний аналіз розвитку штучного інтелекту, який засвідчує, що його становлення є результатом багаторічної еволюції міждисциплінарних ідей – від філософських уявлень про мислення машин до математичних і обчислювальних моделей. Від перших алгоритмічних підходів та логічних машин до сучасних глибоких нейронних мереж, ШІ пройшов шлях численних криз і проривів. Особливо важливою стала поява машинного навчання, що забезпечило здатність систем до самонавчання й адаптації. Таким чином, історія ШІ відображає поступове зміщення фокусу з ручного програмування до створення моделей, здатних до автономного прийняття рішень.

4. На основі системного аналізу наукових джерел у галузі будівництва та цифрових технологій уточнено зміст провідної категорії дослідження – «оцінка технічного стану будівельних конструкцій з використанням інтелектуальних інформаційних систем». Її визначено як комплексний інженерно-цифровий процес, спрямований на безперервне спостереження, діагностику та прогнозування стану конструкцій із застосуванням цифрово-адаптованих

мережевих моделей, технологій BIM-моделювання, сенсорної аналітики та елементів інтелектуальних систем обробки даних. Такий підхід забезпечує адаптивність до умов експлуатації споруд, своєчасне виявлення критичних відхилень, підвищує достовірність управлінських рішень щодо експлуатації, реконструкції чи відновлення об'єктів, а його інтеграція в девелоперські проекти формує замкнений цикл цифрового управління технічним станом будівельних і інженерних споруд.

5. Розглянуто сучасний етап розвитку концепція штучного інтелекту, що набула комплексного характеру, поєднуючи досягнення в галузях інформатики, лінгвістики, когнітивістики та інженерії. Актуальний рівень ШІ характеризується здатністю обробляти великі обсяги даних, виявляти закономірності, прогнозувати події та приймати рішення в реальному часі. Сучасні алгоритми, такі як глибоке навчання, комп'ютерний зір і обробка природної мови, значно розширили сферу практичного застосування ШІ в будівельній галузі в цілому та в системі моніторингу мостових об'єктів зокрема.

6. Доведено, що застосування BIM стало каталізатором цифрової трансформації галузі, дозволивши інтегрувати архітектурні, конструктивні та інженерні дані в єдиному середовищі. Еволюція технології інформаційного моделювання (BIM) у будівництві демонструє перехід від простого 2D-проектування до комплексного управління інформацією на всіх етапах життєвого циклу об'єкта – від концепції до експлуатації та демонтажу. Це сприяє підвищенню точності проектування, скороченню помилок на будівельному майданчику, ефективнішому плануванню ресурсів і прозорості прийняття рішень. Таким чином, BIM стає не лише інструментом проектування, а й основою цифрового управління будівництвом.

7. Виявлено, що розвиток інформаційного моделювання в будівництві відбувався у тісному зв'язку з удосконаленням програмного забезпечення, зростанням обчислювальних потужностей і появою концепцій «розумного

будівництва». Сучасний BIM охоплює не лише геометрію та технічні характеристики об'єкта, але й часові, вартісні, експлуатаційні та екологічні параметри, формуючи багатовимірні цифрові моделі (4D, 5D, 6D, 7D тощо). Це відкриває нові можливості для моделювання сценаріїв, оптимізації процесів і зниження життєвих витрат об'єктів. У перспективі BIM відіграватиме ключову роль у розвитку сталого будівництва, смарт-інфраструктури та цифрових близнюків.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНО-МЕТОДИЧНЕ ПІДГРУНТЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМАЛІЗАЦІЇ ЦИКЛУ ПРОЄКТІВ ВІДНОВЛЕННЯ У ДІДЖИТАЛ-АДАПТОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ОРГАНІЗАЦІЇ БУДІВНИЦТВА

2.1. Визначення методичних засад формування підсистеми цифрової інфраструктури оцінювання та контролю технічного стану будівельних конструкцій і споруд

Сучасні мостові конструкції – це складні споруди, що відрізняються між собою технічними рішеннями, розмірами, використовуваними матеріалами, масою та іншими характеристиками. Технічний стан мостів визначається рівнем їх функціональних споживчих властивостей: несучої здатності, пропускної здатності, безпеки руху, пожежної та екологічної безпеки, захисту від екстремальних природних і техногенних впливів, довговічності. При цьому різні види пошкоджень впливають на конкретні споживчі властивості: силові - на несучу здатність, корозійні - на довговічність, а пошкодження мостового полотна – на пропускну здатність і безпеку руху. У процесі експлуатації перемички піддаються різним навантаженням, які призводять до розвитку дефектів і, в кінцевому підсумку, до втрати несучої здатності конструкції. Для запобігання подібних ситуацій використовуються різні методи оцінки технічного стану конструкцій. Це поняття відноситься до набору індивідуальних характеристик і критеріїв, які дозволяють визначити відхилення локальних або інтегральних параметрів, що характеризують роботу конструкції, від деяких вихідних значень, наприклад, тип і розмір дефектів, напружень, деформацій, величин прогинів, частот вібрації і т.д.

Наступна частина параграфа презентує аналіз світового досвіду обстеження та оцінки технічного стану мостових конструкцій.

У Німеччині промисловий стандарт регулює вимоги до технічного моніторингу стану та випробувань інженерних споруд на магістралях [63]. Моніторинг і випробування повинні надавати об'єктивну інформацію про стійкість і вплив штучних споруд на безпеку руху. Крім того, процес моніторингу та випробувань має оцінити технічний стан об'єкта. Основна мета регулярного моніторингу та випробувань – вчасно виявити дефекти штучних споруд, що виникли, та оперативно їх усунути, тобто до того, як вони обернуться серйозними пошкодженнями та виникне реальна загроза безпеці. Контроль за станом штучних споруд передбачає щоквартальні поточні спостереження та щорічні огляди. Випробування штучних споруд передбачає проведення:

- простих випробувань кожні 3 роки (визначення несучої здатності, визначення фактичного стану);
- основних випробувань кожні 6 років (оцінка стану фундаментів, елементів масивних будівель, сталевих та інших металевих конструкцій, геодезичні вимірювання);
- спеціальних випробувань (терміни не регламентуються).

У Швейцарії всі штучні споруди підлягають ретельній перевірці один раз на 5 років і, крім того, проводяться 3-4 перевірки протягом 5 років [65]. Дефекти в основному належать до однієї з наступних груп: тріщини, відколи та інші дефекти бетону;

- корозія арматури;
- дефекти компенсаторів;
- дефекти опорних компонентів;
- поганий дренаж;
- загальні деформації складових прольоту;
- зміщення фундаментів.

Основним принципом обслуговування штучних споруд є своєчасне виявлення дефектів і їх оперативне усунення. Крім періодичних перевірок,

проводяться спеціальні перевірки у випадках, коли конструкція зазнавала особливих навантажень (надмірне навантаження, повінь, землетрус, аварія). Коли неможливо візуально оцінити стан деяких частин штучної споруди, застосовують неруйнівні методи контролю. Ці методи визначають міцність бетону, глибину карбонізації бетону, його структуру, товщину захисного шару, наявність прихованих раковин або пустот.

Проблеми експлуатації мостів у Великій Британії розглядаються в роботі [67], де автори звертають увагу на те, що в мостобудуванні склалася ситуація, коли завдання оцінки технічного стану існуючих мостів вийшли на той же рівень важливості, що й завдання проектування та будівництва нових мостів. Кілька вказівок і стандартів у Великобританії регулюють перевірку та технічне обслуговування конструкцій мостів, розроблених різними організаціями, такими як Британський інститут стандартів, Національні автомобільні дороги та інші галузеві організації. Основні документи включають «CS 450 Inspection of Highway Structures» [68], який встановлює вимоги до регулярних перевірок мостів, і «CS 454 Assessment of Highway Bridges and Structures» [69], який використовується для оцінки стану мостів і планування ремонту. CS 450 описує вимоги до перевірки та звітності для конструкцій автомагістралей і магістральних доріг, включаючи конструкції мостів. Обсяг перевірки включає всі конструктивні компоненти та пов'язані структурні та неструктурні компоненти, що стосуються поведінки, стійкості та безпеки конструкції. CS 454 призначений для оцінки конструктивної безпеки та придатності до експлуатації дорожніх мостів і споруд. Стандарт визначає кроки та процедури, необхідні для проведення оцінки мосту, а також встановлює принципи та критерії, що використовуються в аналізі безпеки конструкції. Використання стандарту забезпечує єдиний підхід до оцінки стану мостів, що сприяє збереженню безпеки та надійності транспортної інфраструктури.

Перевірки поділяються на чотири типи, які відрізняються обсягом та детальністю.

Перший тип – поверхневий огляд, що проводиться дорожніми інспекторами для визначення поточної придатності об'єкта до експлуатації.

Другий тип – загальний огляд, який здійснюється кожні два роки і передбачає візуальну перевірку без застосування спеціального обладнання. Він охоплює елементи конструкції, що легко доступні, а також смугу перешкод.

Третій тип – основна перевірка, що є ретельним візуальним оглядом конструкції. Вона виконується спеціально підготовленою бригадою щонайменше раз на шість років.

Четвертий тип – спеціальна перевірка, проводиться в разі потреби для поглибленого аналізу технічного стану об'єкта.

Перевірки мостів у Франції проводяться за процедурою, подібною до британської, оскільки стандарти в обох країнах були розроблені спільно англо-французьким консорціумом Bridge Liaison Group у 1990-х роках [70]. Найпомітніші відмінності полягають у сфері застосування нормативів (для кожного об'єкта з прольотом понад два метри) та у часових інтервалах між перевітками. Поверхневі огляди здійснюються один раз на три роки, тоді як основні – з інтервалом від одного до дев'яти років залежно від технічного стану об'єкта.

У Сполучених Штатах правовою основою вимог щодо обслуговування мостової інфраструктури є Кодекс федеральних правил, тоді як за впровадження стандартів обслуговування відповідає Федеральне управління автомобільних доріг (FHWA). Агентством, яке розробляє та підтримує ці стандарти інспектування, є Національна кооперативна програма з досліджень у галузі транспортної інфраструктури (НКПЗП). Стандарти діють на федеральному рівні, а місцеві стратегії технічного обслуговування затверджуються відповідними департаментами транспорту штатів (DOT).

Документи, що описують методологію проведення інспекцій мостів і стратегії їх ефективного обслуговування, включають, зокрема: перші «Національні стандарти інспекції мостів» 1971 року [72], «Практики інспекції

мостів» [74], розроблені в межах програми NCHRP, та «Посібник із збереження мостів» FHWA [75]. Останні два документи створені під керівництвом Міністерства транспорту США (USDOT).

Перший кодифікований опис методики перевірки мостів у США було розроблено після катастрофи на Срібному мосту в Пойнт-Плезанті у 1967 році, яка спричинила загибель 46 осіб. Відтоді стандарти постійно оновлюються, зокрема із врахуванням практик, упроваджених окремими департаментами транспорту штатів, а також результатів опитування 2003 року, проведеного FHWA та AASHTO серед країн, таких як Німеччина, Франція та Велика Британія. Саме тому підходи до обслуговування мостів у США дедалі більше наближаються до європейських.

З 1972 року Національний кадастр мостів (NBI) є основним джерелом даних для управління мостами в Сполучених Штатах [21]. Згідно з Національними стандартами перевірки мостів, дорожні мости повинні перевірятися кожні два роки, а оцінка стану компонентів мосту реєструється в базі даних NBI. Оцінка стану мостів у США в основному проводиться шляхом візуального огляду [76]. Зміст огляду автомобільного мосту включає візуальний огляд, внутрішній огляд, оцінку механічних характеристик та перевірку геометричних параметрів. Оцінка конструктивних елементів мосту базується на суб'єктивних оцінках інспекторів і є однозначним числом, що характеризує загальний стан оцінюваного елемента за шкалою від 0 до 9 [77, 78].

У процесі вдосконалення управління інфраструктурою було створено систему Pontis, яка нині використовується під назвою AASHTOWare Bridge Management Software більш ніж у 40 департаментах транспорту штатів [79].

Інспекції проводяться групами мостових інспекторів, зазвичай з двох осіб, які працюють у штатних DOT. У виняткових випадках, наприклад, для невеликих споруд, огляд може здійснювати одна особа. Існує вісім типів інспекцій, з яких лише три – звичайна, підводна та структурно критична –

мають визначену регламентом періодичність. Для оцінки стану конструкцій використовується чотирирівнева система.

Звичайні інспекції проводяться щорічно або раз на два роки, залежно від вимог конкретного штату. Вони здійснюються візуальним методом з використанням нівелювання, вимірювання габаритів, оцінки технічного стану перепони, а у випадку дерев'яних елементів – контрольним бурінням. Інспекція обов'язково враховує попередню документацію для фіксації змін у стані об'єкта.

Підводна інспекція виконується раз на 60–72 місяці. Її проходить лише близько 6% мостів, хоча приблизно 84% усіх мостів у США перетинають певний водний об'єкт. Таку інспекцію проводять у випадках, коли огляд з берега або зондування дна є неможливими – зазвичай при глибині води понад 2 метри. Основна мета – візуально виявити вимивання ґрунту з-під фундаментів.

Критична інспекція стосується елементів, важливих для безпеки конструкції. Вона проводиться кожні два-три роки та охоплює складні об'єкти, зокрема розвідні, підвісні та вантові мости. До огляду залучають фахівців з відповідною кваліфікацією.

Інші типи інспекцій не мають чітко встановлених інтервалів. До них належать:

- інспекція пошкоджень, що проводиться після аварій чи інцидентів;
- інспекція крупним планом – розширена візуальна оцінка з відстані приблизно одного метра;
- детальна інспекція окремих елементів конкретного мосту;
- первинна інспекція під час введення об'єкта в експлуатацію;
- експертний висновок у разі спеціальних обставин.

Загальна стратегія обслуговування в США ґрунтується на превентивному ремонті, що пояснюється, зокрема, відносно молодим віком більшості об'єктів інфраструктури. Цей підхід передбачає регулярні невеликі витрати на очищення, фарбування металевих елементів, герметизацію тріщин – аби

уникнути витрат на капітальний ремонт у майбутньому. З цією метою на федеральному рівні діє програма системного профілактичного обслуговування (SPM), яка базується на моделі поступової деградації технічного стану конструкцій [80]. Програма пов'язана з механізмами федерального фінансування, доступного для департаментів транспорту штатів.

В Австралії та Новій Зеландії за утримання мостів відповідають понад 800 державних і приватних установ [81]. Подібно до США, на рівні штатів діють дев'ять державних агентств, а центральним урядовим органом є Департамент інфраструктури, транспорту, регіонального розвитку та зв'язку.

Кожне з дев'яти місцевих агентств має власні адміністративні вказівки щодо управління мостами завдовжки понад три метри, які, однак, значною мірою збігаються. Це пояснюється тим, що впроваджені рекомендації базуються на американській системі Pontis. На національному рівні процедури описано у звіті урядової агенції Austroads від 2018 року, який також був прийнятий у Новій Зеландії.

Австралійська модель обслуговування мостів передбачає три рівні контролю.

Перший рівень включає регулярні перевірки, які проводяться кожні шість–дванадцять місяців або позапланово – у разі загроз для споруди (наприклад, під час паводків). Ці перевірки здійснюються візуально, охоплюють видимі та легкодоступні елементи конструкції і виконуються інженером з обслуговування інфраструктури. Результати використовуються для оперативного планування ремонтних робіт.

Другий рівень – це огляд технічного стану споруди, який виконує спеціально підготовлений інспектор мостів у супроводі інженера-проектувальника або фахівця. Як і попередній, цей огляд є візуальним, але охоплює всі конструктивні елементи над водною поверхнею. Стан елементів оцінюється за чотирибальною або шестибальною шкалою. Інтервал між такими оглядами становить від чотирьох до десяти років – залежно від норм місцевої

адміністрації. Отримані результати слугують підставою для впровадження коригувальних заходів.

Третій, заключний рівень перевірки проводиться за необхідності – якщо попередній етап виявив серйозні дефекти або сумніви щодо стану мосту. У такому разі обстеження здійснюється спеціалізованими групами, які виконують випробування на міцність, визначають технічний стан елементів конструкції, несучу здатність та залишковий строк служби. Ця фаза передбачає детальний огляд, застосування неруйнівних методів контролю, а також організацію довгострокового моніторингу споруди.

Австралія стала однією з перших країн, що запровадили ІТ-системи управління мостовою інфраструктурою. Першу з них – MRWA – було впроваджено ще наприкінці 1980-х років. Вона також є власником найстарішої адміністративної ІТ-системи для управління дорожньою інфраструктурою на державному рівні, яка у 2002 році працювала вже понад тридцять років безперервно. Інші подібні системи були розроблені в окремих адміністративних одиницях і використовуються, зокрема, для збору інформації про мости, їх технічний стан, каталогізації звітів з інспекцій і формування обґрунтованого бюджету на ремонтні роботи.

Спочатку агентством, яке керувало дорожньою інфраструктурою на адміністративному рівні в Японії, була компанія Japan Public Roads Company, заснована у 1956 році. Вона управляла всією мережею доріг у країні до 2005 року, коли її було приватизовано та розділено на три окремі компанії, відповідальні за різні регіони Японії. На підставі державних контрактів ці компанії здійснюють планування, будівництво та управління дорожніми інженерними спорудами. Лише у 2013 році вони були юридично зобов'язані впровадити модель превентивного обслуговування інфраструктури в поєднанні з регулярними перевірками технічного стану [103, 105].

Періодичні перевірки інфраструктури в Японії проводять групи з чотирьох осіб: інспектор мосту, його помічник, технік мосту та технічний

асистент. Відповідно до інструкції, лише головний інспектор повинен мати відповідну загальну освіту; інші члени групи мають мати лише відповідний професійний досвід. Перевірки поділяються на два типи: первинну та планову. Первинна перевірка здійснюється перед введенням об'єкта в експлуатацію, а планові перевірки проводяться кожні п'ять років. Звичайний огляд виконується візуально, без використання спеціального обладнання. Під час огляду не проводяться заміри пошкоджень або конструктивних елементів, а оцінка їхнього стану здійснюється за чотирибальною шкалою, що визначає потребу в ремонтних заходах: I – ремонт не потрібен, IV – аварійний стан. У посібнику не вказано інші типи перевірок, однак інспектор може присвоїти елементу клас «S», що означає необхідність додаткових випробувань [83].

Мостова інфраструктура Бразилії перебуває під управлінням Федерального департаменту транспорту та його підрозділів. Поточне технічне обслуговування і перевірки виконуються відповідно до національного стандарту DNIT 010/2004, який подібний до австралійської системи, частково заснованої на американському проєкті Pontis, а також на застарілих інструкціях зі США, зокрема Стандартах інспекції мостів 1997 року. Перевірки проводяться оглядачем польового мосту разом з технічним помічником. У виняткових випадках перевірку може виконувати старший інспектор із досвідом роботи щонайменше 10 років. Стандарт визначає п'ять типів перевірок, що здійснюються протягом життєвого циклу мосту:

1. Приймальний огляд – проводиться перед введенням об'єкта в експлуатацію, а також після його реконструкції чи модернізації. Він детально документується (у тому числі фотографічно) і слугує базовим орієнтиром для усіх подальших перевірок і ремонтів.

2. Планова перевірка – здійснюється кожні два роки. Під час неї проводиться візуальний огляд об'єкта з фіксацією нових пошкоджень і аналізом розвитку старих.

3. Позачергова перевірка – проводиться після виняткових подій, таких як стихійні лиха. Її мета – швидка оцінка завданих збитків, аналіз несучої здатності конструкції та пришвидшення процесу реновації.

4. Спеціальна перевірка – виконується щонайменше один раз на п'ять років. Це розширене візуальне обстеження, аналогічне до детальної перевірки в Польщі. Оглядаються важкодоступні елементи конструкції, складається повна фото документація. Її також можуть призначити на основі результатів планової перевірки.

5. Проміжний огляд – застосовується для перевірки конкретних пошкоджень, виявлених під час інших видів перевірок.

Документація за результатами перевірок зберігається у паперовій формі в архіві об'єкта.

У Польщі «Інструкція з проведення дорожнього огляду інженерних споруд» [85] визначає періодичність, мету, спосіб проведення та документування огляду. Інженерні споруди обстежуються з метою виявлення загроз безпеці їх використання, підтримання їх у належному технічному та естетичному стані, недопущення надмірного погіршення функціональних властивостей та технічної ефективності. Для уніфікації методики оцінки інженерних споруд різними інспекторами запроваджено «Принципи застосування шкали бальних оцінок технічного стану та придатності до експлуатації інженерних споруд доріг» [87] (далі – Принципи). Принципи містять вказівки, поради та приклади, якими повинен керуватися інспектор мосту при оцінці окремих елементів інженерних споруд під час основного та розширеного оглядів.

Технічний стан окремих складових інженерних споруд оцінюється за шестибальною шкалою за критеріями (табл. 2.1):

Оцінка технічного стану складових інженерних споруд в Польщі*Джерело: розроблено автором*

Стан	Оцінка в балах	Характеристика
Стан відповідний	5	відсутність пошкоджень та забруднень, які могли б бути виявлені під час огляду
Стан задовільний	4	виявлено перші ознаки пошкодження або забруднення, що погіршують естетичний вигляд
Стан тривожний	3	виявлено пошкодження, неусунення яких скоротить термін безпечної експлуатації
Стан незадовільний	2	виявлені пошкодження, що знижують корисність споруди, але можуть бути усунені
Стан передаварійний	1	виявлено незворотні пошкодження, що виключає придатність об'єкта
Стан аварійний	0	об'єкт зруйнований або не існує

Правилами передбачено обстеження та оцінку технічного стану 21 елемента конструкції мосту. Рейтинг всього об'єкта визначається як найменше значення з кількох варіантів:

- середнє арифметичне всіх оцінюваних компонентів,
- оцінка конструкції мосту,
- оцінка конструкції основної балки,
- середнє арифметичне оцінки опор і стовпів.

Періодичність огляду автомобільних мостів в Україні регламентується «ДБН В.2.3-6:2009 Мости і труби. Обстеження та випробування» [88] і залежить від їх віку. Мости віком від 1 до 20 років перевіряють кожні 5 років, від 21 до 40 років – кожні 4 роки, від 41 до 60 років – кожні 3 роки, а мости старше 60 років - кожні 2 роки.

Ці норми визначають вимоги щодо обстеження та випробування мостів і труб усіх систем і конструкцій як під час введення їх в експлуатацію, так і під час подальшого використання – незалежно від їхнього функціонального

призначення. Вимоги поширюються на мости й труби, розташовані на таких об'єктах:

- залізниці;
- автомобільні дороги загального користування;
- вулиці та дороги міст і інших населених пунктів;
- лінії метрополітену і трамвая;
- внутрішньогосподарські дороги та проїзди;
- дороги, спільні для руху автомобільного транспорту з залізницею, метрополітеном або трамваєм.

Обстеження автомобільних мостів слід проводити згідно з періодичністю, наведеною в таблиці 2.2, якщо інші строки не визначено попереднім звітом з обстеження.

Таблиця 2.2

Періодичність обстеження автодорожніх мостів

Джерело: розроблено автором

Вид обстеження	Міст	Вік моста, років			
		1-20	21-40	41-60	>60
		Періодичність обстеження, років			
Планове	Металевий, залізобетонний, сталезалізобетонний	5	4	3	2
	Дерев'яний	3	2	1	-
Позапланове: -спеціальне -маршрутне	За необхідністю				

Планові обстеження мостів, що перебувають в експлуатації включають попередні та детальні обстеження.

Попереднє обстеження передбачає:

- аналіз технічної документації (проектної, виконавчої, експлуатаційної);

- візуальний огляд елементів споруди з метою виявлення суттєвих дефектів і пошкоджень;

- підготовку виконавцем програми для детального обстеження або висновку про доцільність його проведення.

Детальне обстеження охоплює:

- вимірювання розмірів конструкцій та їх перерізів, визначення фізико-механічних властивостей матеріалів;

- геодезичний контроль просторового положення елементів (осідання, прогини, крени тощо);

- огляд конструкцій з фіксацією усіх дефектів та змін характеристик, із зазначенням розмірів, ескізами, фото- та/або відеофіксацією;

- аналіз розмиву русла та стану заплав;

- оцінку стану дамб, укосів, конусів, траверс;

- визначення умов і швидкості руху транспортних засобів на мосту та підходах.

Позапланові спеціальні обстеження охоплюють увесь перелік робіт планового обстеження (згідно з п. 5.2), а також можуть включати додаткові заходи:

- геодезичний моніторинг деформацій, кренів, осідань конструкцій (відповідно до ДБН В.1.3-2);

- підводне обстеження опор;

- визначення марки сталі, її хімічного складу;

- натурні статичні та/або динамічні випробування.

Перед початком робіт складається та затверджується програма обстеження. У процесі виконання робіт перелік може бути скоригований відповідно до отриманих даних. За результатами планового чи позапланового обстеження оформлюється звіт та оновлюється паспорт (картка) споруди. У паспорті зазначається дата та строк наступного обстеження. Паралельні мости, прогонові споруди яких не об'єднані спільною плитою проїзної частини або

іншими елементами поперечного з'єднання, вважаються окремими спорудами – навіть якщо мають спільні координати початку та кінця, а опори мають спільний фундамент. У разі, якщо міст перетинає річку, обов'язковому обстеженню підлягають також підмостове русло та регуляційні споруди.

Моніторинг мосту можна умовно розділити на два процеси: технічне обстеження та кількісна оцінка технічного стану. Технічне обстеження полягає у проведенні візуальної оцінки стану об'єкта (складових частин об'єкта) з фіксацією виявлених конструктивних і стандартних відхилень. Вихідними даними технічного обстеження є якісні та кількісні показники експлуатаційних властивостей споруди, які дозволяють оцінити технічний стан споруди, визначити залишковий ресурс споруди, спланувати експлуатацію мосту.

Оцінка технічного стану автомобільних мостів в Україні здійснюється на підставі «ДСТУ 9181:2022 Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» [89]. Цей стандарт визначає вимоги щодо оцінювання технічного стану мостів та прогнозування залишкового ресурсу їхніх елементів. Його дія поширюється на постійні автодорожні мости всіх типів, які використовуються на автомобільних дорогах загального користування, а також на вулицях і дорогах у межах населених пунктів. Стандарт застосовується в межах системи експлуатації автодорожніх мостів. Оцінювання технічного стану, контроль надійності та прогнозування залишкового ресурсу конструкцій є обов'язковими регламентованими процедурами в цій системі.

Технічний стан - це сукупність якісних і кількісних показників, що характеризують експлуатаційну придатність споруди. Міст розглядається як система із семи груп конструктивних елементів:

- елементи прогонової будови;
- опори та опорні частини;
- фундаменти;
- підмостове русло;

- елементи проїзної частини;
- підходи;
- регуляційні споруди.

Алгоритм оцінювання і прогнозування технічного стану мостових конструкцій включає такі основні етапи:

1. Збір вихідних даних для оцінювання та прогнозування технічного стану елементів моста.
2. Визначення стану елементів моста згідно з класифікаційними таблицями експлуатаційних станів.
3. Уточнення технічного стану на основі розрахунку вантажопідйомності конструктивних елементів.
4. Оцінювання стану елементів за реальними характеристиками їхньої безпеки.
5. Призначення необхідних експлуатаційних заходів відповідно до отриманих результатів.
6. Прогнозування строку безпечної експлуатації (визначення залишкового ресурсу конструкцій).
7. Комплексна оцінка технічного стану всього моста для визначення доцільності проведення експлуатаційних або ремонтних робіт.

Визначення експлуатаційного стану елементів моста здійснюється на основі аналізу наступних даних:

- первинна технічна та експлуатаційна документація моста;
- історія експлуатації споруди;
- результати детального обстеження конструкції та її окремих елементів;
- показники реальної міцності матеріалів конструктивних елементів;
- результати перевірочних розрахунків вантажопідйомності;
- реальні характеристики безпеки елементів;
- за потреби – результати випробування моста пробним навантаженням.

Протягом усього життєвого циклу елементи моста передбачається перебувають в одному з п'яти експлуатаційних станів, наведених у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Класифікація експлуатаційних станів елементів

Джерело: розроблено автором

Експлуатаційний стан	Назва експлуатаційного стану	Узагальнена характеристика стану
Стан 1	Справний	Елемент відповідає всім вимогам проєкту та чинних норм експлуатації
Стан 2	Обмежено справний	Елемент частково не відповідає вимогам проєкту, проте не порушуються вимоги першої і другої груп граничних станів
Стан 3	Працездатний	Елемент частково не відповідає вимогам проєкту, проте не порушуються вимоги першої групи граничних станів. Можливе часткове порушення вимог другої групи граничних станів, якщо це не обмежує нормального функціонування споруди
Стан 4	Обмежено працездатний	Можливе часткове порушення вимог першої групи граничних станів. Порушуються вимоги другої групи граничних станів. Споруда експлуатується в обмеженому режимі і вимагає спеціального контролю за станом її елементів
Стан 5	Непрацездатний	Елемент не відповідає вимогам першої групи граничних станів і з'ясовується неможливість їх задоволення, що свідчить про необхідність припинення експлуатації споруди

Після огляду елементів мосту виявлені дефекти, пошкодження та інші ознаки деградації порівнюють з даними, що містяться в Класифікаційних таблицях експлуатаційних станів елементів моста. Стандарт містить 18

класифікаційних таблиць, що стосуються всіх найважливіших компонентів моста. За результатами порівняння кожному елементу моста присвоюється технічний стан від 1 до 5 («Стан 1» – справний, «Стан 2» – частково справний, «Стан 3» – прийнятно справний, «Стан 4» – майже непридатний, «Стан 5» – непридатний).

Після оцінки умов експлуатації групових елементів оцінюють технічний стан мосту в цілому:

$$E = \frac{80 \times (5 - \sum_{i=1}^7 a_i D_i)}{4} + 20 \quad (2.1)$$

де: a_i – коефіцієнт впливу умови i -го складова про загальний стан конструкції (затверджено в ДСТУ-Н В.2.3-23), D_i – оцінка експлуатаційного стану групи деталей.

Залежно від значення оцінки технічного стану (E) мосту присвоюється відповідний стан та визначається необхідність виконання експлуатаційних заходів. «Умова 1» відповідає кількості балів 100 - 95, «Умова 2» – 94 - 80, «Умова 3» – 79 - 60, «Умова 4» – 59 - 40, «Умова 5» – 39 - 20.

Підсумовуючи міжнародний досвід сучасні методи обслуговування та управління мостовою інфраструктурою можна поділити на чотири основні групи:

1. Методи постійного контролю технічного стану мостових конструкцій та сучасні технології вимірювань,
2. Вивчення пошкоджень, чинників, що спричиняють утворення та розвиток дефектів, а також методів управління пошкодженнями,
3. Техніка ремонту, відновлення та модернізації,
4. Розробка та оцінка моделей управління, технічного обслуговування, оптимізації процесів управління і визначення загальних витрат на експлуатацію мостових споруд.

Перша з означених груп охоплює:

- використання сучасних датчиків і вимірювального обладнання,

- детальний опис методів моніторингу мостів,
- тематичні дослідження, що поєднують обидва напрямки,
- роботи, присвячені інтеграції кількох методів вимірювання в системи моніторингу інфраструктури.

2.2. Формування логіко-аналітичного ядра системи оцінювання технічного стану з використанням штучного інтелекту, нечіткої логіки та BIM-моделювання

Мости є важливим елементом інфраструктури і потребують постійної уваги для забезпечення безпеки та ефективності транспортних систем. Традиційні методи обстеження та оцінки технічного стану мостів мають свої обмеження, тому для вирішення цієї проблеми набуває популярності використання штучного інтелекту [112, 114]. Останні дослідження та публікації в галузі моніторингу мостів показують, що використання ШІ може значно підвищити ефективність і точність процесу моніторингу. Дослідники використовують ШІ для аналізу даних, отриманих від датчиків і систем моніторингу [90, 91]. Це дозволяє автоматично виявляти аномалії, класифікувати пошкодження та прогнозувати термін служби компонентів моста.

Використання ШІ при дослідженні та оцінці технічного стану мостів має великий потенціал. Це відкриває нові перспективи для підвищення ефективності та надійності інфраструктури. Однак використання інструментів ШІ для вирішення цієї проблеми має кілька недоліків. У таблиці 1 систематизовано переваги та недоліки використання інструментів ШІ за декількома критеріями – аналіз даних, виявлення, автоматизація, прогнозування, перевірка та людський фактор.

Переваги та недоліки використання засобів ІІІ в системі дослідження та оцінки технічного стану мостів [92–96]

Характеристики	Переваги	Недоліки
Аналіз даних	Підвищена точність і швидкість обробки великих обсягів даних	Залежність від якості даних, складність інтерпретації результатів
Виявлення	Раннє виявлення пошкоджень завдяки виявленню аномалій та закономірностей	Потреба у великій кількості даних для навчання
Автоматизація	Автоматизація рутинних завдань, що звільняє час інженерів	Висока вартість впровадження (апаратне забезпечення, програмне забезпечення, навчання)
Прогнозування	Прогнозування залишкових ресурсів та оптимізація планування/бюджетування	Потреба у кваліфікованих спеціалістах для розробки, впровадження та підтримки
Інспекція	Моніторинг у важкодоступних місцях за допомогою дронів та роботів	Проблеми кібербезпеки та вразливості до кібератак
Людський фактор	Зменшення впливу людської помилки	Потреба у висококваліфікованому персоналі

Аналіз основних тенденцій розвитку транспортних систем свідчить про те, що їх еволюцію можна охарактеризувати як ускладнення конструктивних рішень за одночасного спрощення експлуатаційних процесів. Водночас ключовим завданням експлуатації інженерних споруд є забезпечення їх стійкості до агресивних зовнішніх впливів, що мають складну імовірнісну природу.

З огляду на високу складність сучасних інженерних споруд, передбачити всі можливі експлуатаційні ситуації під час розрахунку й проектування практично неможливо, тим більше, що ці ситуації можуть змінюватися в процесі експлуатації. Крім того, у процесі використання споруд

непередбачувано змінюються як властивості матеріалів, так і параметри зовнішніх впливів, а також інші фактори, що супроводжують експлуатацію. У конструкціях виникають і розвиваються дефекти та пошкодження різного характеру, які негативно позначаються на їхньому технічному стані.

Саме тому для забезпечення надійної роботи як нових, так і діючих транспортних споруд необхідно впроваджувати сучасні системи обстеження та оцінювання технічного стану. Це дозволяє своєчасно вживати заходів для гарантування безпечної експлуатації в умовах змінного середовища.

Численні дослідження та публікації свідчать про активний інтерес науковців та практиків до використання штучного інтелекту в системі моніторингу технічного стану мостів. Вони демонструють потенціал штучного інтелекту для виявлення дефектів, прогнозування терміну служби та оптимізації планування ремонту. Використання штучного інтелекту для моніторингу технічного стану мостів є доцільним і має багато переваг. Це дозволяє підвищити ефективність моніторингу, забезпечує точність оцінки стану транспортних споруд, прогнозує можливі пошкодження, покращує планування технічного обслуговування та ремонту.

Подальші дослідження в цьому напрямку можуть включати розробку нових алгоритмів аналізу даних, використання більш прогресивних технологій збору даних, розробку систем прогнозування та врахування впливу зовнішніх факторів, таких як погода, на технічний стан мостів [97]. Однак багато з цих досліджень все ще вимагають додаткових експериментів і практичних тестів, щоб підтвердити ефективність використання штучного інтелекту.

Останнім часом різні інструменти машинного навчання (ML) загалом і нейронна мережа зокрема активно використовуються як інструмент прийняття рішень у різних сферах управління мостами, таких як кількісна оцінка стану, виявлення пошкоджень і прогнозування стану [92, 98].

Аналіз літератури показує, що SHM активно використовуються в різних сферах управління мостами. Використання штучних нейронних мереж дозволяє

вирішувати задачі кількісної оцінки стану елементів мосту, виявлення факторів, які найбільше впливають на знос моста, виявлення пошкоджень, прогнозування стану. В даний час для аналізу візуальних зображень активно використовуються різні типи згорткових нейронних мереж. Для вирішення завдань оцінки поточного та прогнозування технічного стану мосту автори в більшості випадків використовували комплекси історичних даних, отриманих під час обстеження мостів. На жаль, як зазначалося раніше, в Україні відсутня база історичних даних про стан деталей мостів в електронному вигляді. У зв'язку з цим була використана база даних NBI.

Вчені використовували різні методи ML для виявлення дефектів у залізобетонних конструкціях. Наприклад, регресійний аналіз передбачає аналіз кореляції між зовнішніми проявами та дефектами структури за допомогою статистичних методів. Мережа Байєса – це графічна модель, яка представляє ймовірнісні зв'язки між змінними. З його допомогою можна визначити найбільш імовірні причини дефектів за спостережуваними зовнішніми проявами. Нейронні мережі – це тип алгоритму ML, який можна використовувати для аналізу великих наборів даних і виявлення закономірностей, які людям важко розрізнити. Їх можна навчити визначати найбільш ймовірні причини дефектів на основі спостережуваних зовнішніх проявів. Нечітка логіка – це математична основа для роботи з невизначеністю та неточністю. Його можна використовувати для моделювання причинно-наслідкових зв'язків між зовнішніми проявами та дефектами структури, навіть якщо зв'язки не є чітко визначеними.

Ці методи можна використовувати як окремо, так і в комплексі для встановлення причинно-наслідкових зв'язків між зовнішніми проявами та дефектами у залізобетонних конструкціях. Однак важливо зазначити, що жоден метод не може дати остаточну відповідь. Для інтерпретації результатів все ще потрібні експертне судження та знання галузі.

Загалом, методи ML можна використовувати в інфраструктурі мосту різними способами [118, 119]. Моделі можуть допомогти в аналізі різних факторів ризику, які сприяють управлінню мостами, таких як моделі руху, умови навколишнього середовища та структурні характеристики [99, 100]. Також вони можуть аналізувати історичні дані про трафік, включаючи типи транспортних засобів, обсяги та навантаження, щоб передбачити майбутні моделі руху та навантаження на мости [101]. Алгоритми ML можна використовувати для оптимізації конструкції мосту шляхом аналізу історичних проектних даних, даних про продуктивність існуючих мостів і структурного моделювання [120, 121]. Одним із найважливіших напрямків використання ML у мостобудуванні є виявлення пошкоджень, оцінка та прогнозування технічного стану [102, 104].

Цей напрям можна розділити на дві великі групи залежно від типу вхідних даних (рис. 2.1).

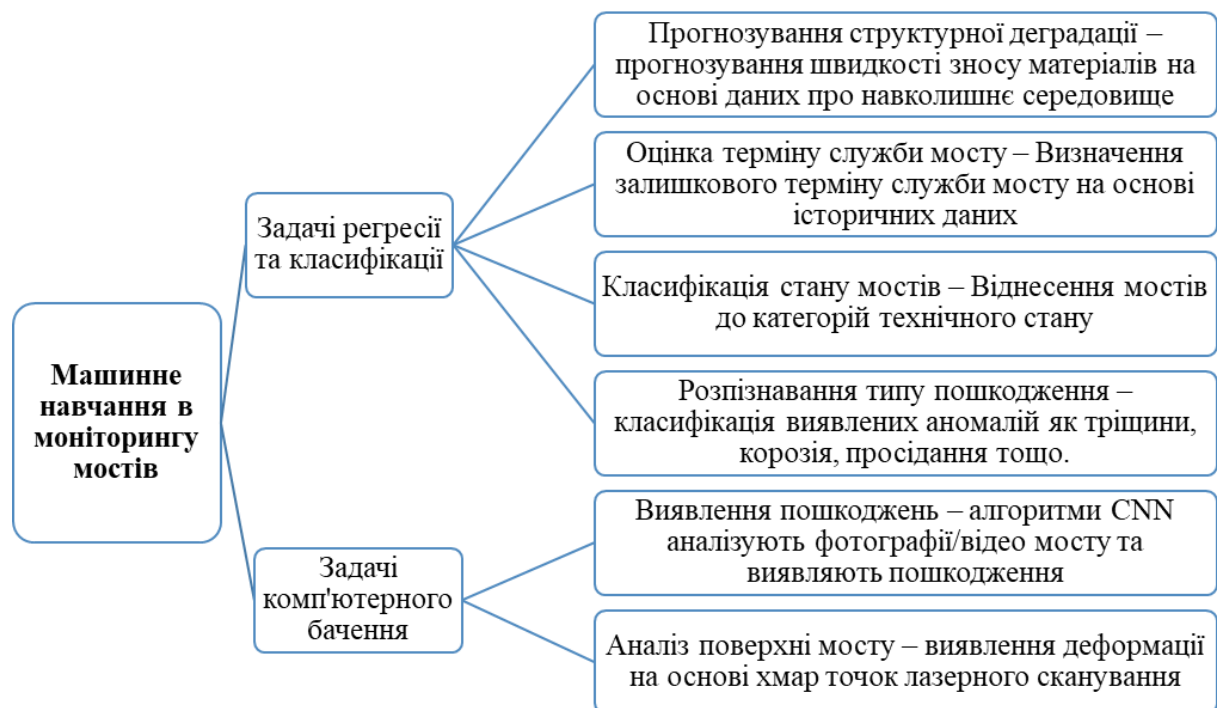


Рис. 2.1. Класифікація задач машинного навчання в моніторингу мостів.

Джерело: розроблено автором

Перший тип – це числове введення. Найчастіше такі проблеми розглядаються як задачі класифікації або регресії та вирішуються за допомогою таких алгоритмів, як опорна векторна регресія, дерева рішень, штучні нейронні мережі тощо. Алгоритми можуть аналізувати історичні дані про стан мосту, записи про технічне обслуговування та фактори навколишнього середовища для розробки прогнозних моделей обслуговування. Такий підхід допомагає оптимізувати графіки технічного обслуговування, продовжити термін служби мостів і мінімізувати збої в роботі.

Другий тип – використовує вхідні дані у вигляді фото- та відеофайлів. Найчастіше такі проблеми розглядаються як задачі класифікації або сегментації і вирішуються за допомогою алгоритмів згорткових нейронних мереж (CNN): U-Net, RCNN, YOLO та ін. Алгоритми ML можуть аналізувати дані, зібрані з датчиків, лазерного сканування, дронів і систем моніторингу. Завдяки автоматичному виявленню та класифікації візуальних дефектів, тріщин або корозії моделі допомагають завчасно визначити пошкодження, забезпечуючи своєчасне технічне обслуговування та знижуючи ризик поломки.

У цьому напрямку моделі ML можна використовувати в таких сферах:

- виявлення та класифікація різних типів дефектів на мостових конструкціях, таких як тріщини, корозія, розколювання або деформації [106]. Навчаючи мережу на мічених зображеннях різних категорій дефектів, вона може навчитися точно ідентифікувати та знаходити ці дефекти [107].

- CNN можуть вивчати нормальні візерунки та візуальні характеристики пошкоджених компонентів моста [108]. Аналізуючи зображення або відео мостів, CNN може виявити аномалії, які відхиляються від очікуваних моделей, висвітлюючи потенційні проблемні області, які потребують подальшої перевірки чи оцінки.

- CNN можуть виконувати сегментацію зображення, щоб відокремити компоненти моста або цікаві області від фону [109]. Це може бути корисним для визначення конкретних ділянок або елементів для подальшого аналізу,

наприклад виявлення тріщин або корозії в певній частині мосту. Наприклад, Geng використовував CNN для виявлення, локалізації та кількісної оцінки корозійних пошкоджень у фермовому мосту за допомогою автокореляції вібраційних сигналів [110].

– порівнюючи зображення або відеозаписи, зняті під час різних циклів перевірки, CNN можуть визначити зміни в стані елементів мосту з часом [111]. Це дозволяє виявити прогресуюче погіршення або зміни, які можуть потребувати уваги або подальшого дослідження.

Варто зазначити, що успішне впровадження ML в мостовій інфраструктурі вимагає доступу до високоякісних і різноманітних даних, а також ретельного навчання моделі, перевірки та інтерпретації.

В розділ 3 даного дисертаційного дослідження було використано один із найбільш ефективних і популярних методів машинного навчання – штучні нейронні мережі.

Штучні нейронні мережі (ШНМ) – це тип алгоритмів машинного навчання, розроблених для імітації структури та функціонування біологічних нейронних мереж у мозку [122, 123]. Вони складаються з трьох ключових компонентів: вхідного шару, одного або кількох прихованих шарів і вихідного шару. Вхідний шар приймає дані для обробки, які надалі проходять через приховані шари, де перетворюються за допомогою зв'язків між вузлами. Зрештою, оброблені дані надходять до вихідного шару, який формує бажаний результат.

Кожен вузол у мережі виконує просту математичну операцію: обчислює зважену суму отриманих вхідних даних і застосовує до неї нелінійну функцію активації. Саме функція активації вводить у мережу нелінійність, що дозволяє моделювати складні залежності між вхідними та вихідними даними.

Під час навчання мережа коригує ваги зв'язків між вузлами, щоб мінімізувати різницю між прогнозованим і фактичним виходом для заданого

входу. Цей процес зазвичай здійснюється за допомогою алгоритмів оптимізації, зокрема градієнтного спуску, який змінює ваги в напрямку зменшення похибки.

Отже, ШНМ є потужними моделями машинного навчання, здатними навчатися робити прогнози або виконувати інші завдання, адаптуючи ваги своїх вузлів відповідно до навчальних даних. Вони широко застосовуються в різних сферах і демонструють високу ефективність у таких завданнях, як прогнозне моделювання, обробка природної мови, розпізнавання мовлення та зображень. ШНМ досягли значного успіху в багатьох галузях, зробивши вагомий внесок у розвиток штучного інтелекту та машинного навчання.

Для оцінювання моделей використовувалися такі метрики: середньоквадратична помилка (MSE) і середня абсолютна помилка (MAE), а для порівняння моделей між собою – середня абсолютна відсоткова помилка (MAPE) і коефіцієнт детермінації (R^2). Порівняльний аналіз ефективності моделей машинного навчання було проведено на основі значень MAPE та R^2 .

Показник MAPE визначається за формулою:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right|. \quad (2.2)$$

де: y'_i – вихідне значення розраховане моделлю, y_i – цільовий значення.

Інтерпретація можливих значень показника MAPE наведена у табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Критерії оцінки показника MAPE

Джерело: розроблено автором

Значення показника	Інтерпретація
$MAPE \leq 10\%$	Точність висока
$10\% < MAPE \leq 20\%$	Точність добра
$20\% < MAPE \leq 50\%$	Точність достатня
$MAPE > 50\%$	Точність недостатня

R^2 – статистичний показник, що використовується для прогнозування майбутніх результатів або перевірки гіпотез:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - y'_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}. \quad (2.3)$$

де: $\bar{y}_i$ – середнє вихідне значення розраховане моделлю.

Інтерпретація можливих значень показника R^2 наведена у табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Критерії оцінки показника R^2

Значення показника	Інтерпретація
$R^2 \geq 0,75$	Детермінація істотна
$0,50 \leq R^2 < 0,75$	Детермінація помірна
$0,25 \leq R^2 < 0,50$	Детермінація слабка
$R^2 < 0,25$	Детермінація дуже слабка

Середньоквадратична помилка (MSE) використовувалася як функція втрат:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2. \quad (2.4)$$

Ефективність прогнозування оцінювалася за допомогою середньої абсолютної помилки (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y'_i - y_i|. \quad (2.5)$$

Машинне навчання – це сукупність методів штучного інтелекту, які застосовуються у випадках, коли складно визначити формальну процедуру для розв'язання заданої задачі. Прикладом є розпізнавання цифр – завдання, що є відносно простим для людини, але складним для комп'ютера. Система

розпізнавання цифр, побудована на основі інструкцій, правил і евристик, працюватиме лише за суворо визначених умов (наприклад, за певного освітлення або на певному фоні) і матиме невисоку точність.

Більш ефективний підхід полягає у використанні алгоритму машинного навчання, який не потребує від розробника явного програмування правил виконання завдання. Такий алгоритм самостійно навчається розпізнавати цифри, аналізуючи зображення разом із відповідними мітками, що вказують, яка саме цифра зображена.

Виконання завдання у машинному навчанні здійснюється моделлю, яку можна уявити як певну математичну функцію із параметрами, що визначають її поведінку. Навички та знання моделі заховані у її структурі та параметрах. Модель може бути навіть простою лінійною функцією виду $y = ax + b$, яка описується лише двома параметрами a та b .

Здатність до виконання завдань формується під час процесу навчання, у ході якого налаштовуються значення параметрів моделі. Навчання передбачає оптимізацію певної цільової функції, яка відображає ефективність виконання завдання.

Модель машинного навчання може бути представлена функцією:

$$y = f(x, \theta) \quad (2.6)$$

де: x – вхідні дані моделі, θ – параметри моделі, y – вихід моделі, f – функція, що реалізується моделлю.

Вхідний приклад можна подати у вигляді вектора $x \in \mathbb{R}$, який також називають представленням прикладу. Представлення складається з окремих чисел - ознак, що описують властивості відповідного навчального прикладу. Представлення може мати фізичну інтерпретацію або бути абстрактним.

Наприклад, вектор, що містить дані про стан пацієнта, значення пікселів зображення або послідовність зразків звукової хвилі, має фізичну інтерпретацію. Натомість представлення без фізичної інтерпретації зазвичай

генерується іншим алгоритмом машинного навчання, наприклад, методом зменшення розмірності.

Обробку вхідних даних в іншу форму називають інженерією ознак. Її метою є перетворення представлення навчальних прикладів у таку форму, яка полегшує навчання моделі та виконання нею завдань. Крім того, зміна представлення може також зменшити обчислювальні витрати за рахунок зменшення розміру вхідних прикладів.

Ще однією важливою концепцією, пов'язаною з машинним навчанням, є вихід моделі. Вихідний сигнал y , згенерований моделлю, може мати різні форми: ціле число, дійсне число, вектор або матрицю. Прикладами вихідних даних можуть бути очищене від шуму зображення, мітка класу або координати об'єктів на зображенні.

Модель є ключовим елементом систем машинного навчання і може мати різні форми – від простої лінійної функції до складних функцій, що описуються мільярдами параметрів. З формою моделі пов'язане поняття простору гіпотез, тобто множини функцій, які може представляти модель. Наприклад, простір гіпотез лінійної регресії включає всі лінійні функції. Зміна простору гіпотез впливає на ємність моделі, тобто її здатність відтворювати широкий спектр взаємозв'язків. Моделі з низькою ємністю, такі як лінійні моделі, не здатні охопити складні взаємозв'язки, необхідні для таких завдань, як класифікація зображень або машинний переклад тексту.

Робота моделі визначається набором параметрів, які встановлюють зв'язок між вхідними даними та вихідним результатом. Параметри налаштовуються під час процесу навчання для досягнення бажаної поведінки моделі. Кількість параметрів у моделях машинного навчання може варіюватися від кількох до кількох мільярдів. Окрім моделей із параметрами, існує окремий клас непараметричних моделей, проте їх розгляд виходить за межі цієї дисертації.

Кероване навчання наразі є одним із найпоширеніших підходів у машинному навчанні. Його суть полягає у знаходженні зв'язку f , що поєднує вхідні дані x із відповідними вихідними значеннями y , на основі навчального набору пар $D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^L$. Під час навчання мінімізується певна функція помилки, яка відображає відповідність між очікуваними значеннями y_i із множини D та значеннями y_i' , згенерованими моделлю для відповідних вхідних даних x_i .

Наприклад, розробка діагностичної системи для виявлення патологічних змін на зображеннях комп'ютерної томографії передбачає використання набору даних, де x_i – це зображення, отримане під час обстеження, а y_i – діагностичний висновок. Великий обсяг навчальних даних і відповідна модель дозволяють досягати задовільних результатів за допомогою навчання з учителем. Однак цей підхід вимагає наявності очікуваних відповідей y , отримання яких зазвичай є дорогим і трудомістким процесом.

Ще однією великою групою методів машинного навчання є методи навчання без учителя. У цьому підході алгоритми самостійно вивчають властивості набору даних $D = \{x_i\}_{i=1}^L$, виявляючи в ньому закономірності, структури та зв'язки. Цей процес часто називають відкриттям знань. На відміну від навчання з учителем, навчання без учителя не потребує наявності очікуваних значень y_i .

Типовими завданнями, які вирішуються за допомогою навчання без учителя, є кластеризація (групування навчальних прикладів), оцінка розподілу ймовірностей, видалення шуму з даних або зменшення розмірності.

Навчання з підкріпленням поєднує риси як навчання з учителем, так і навчання без учителя. Цей метод дозволяє використовувати позначені дані $D_{ozn} = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$ та непозначені дані $D_{nozn} = \{x_i\}_{i=1}^N$.

Напівнавчання з учителем застосовується в ситуаціях, коли лише частина набору даних має позначені мітки. Непозначені приклади можна використовувати для навчання моделі та створення відповідних представлень, що має сприяти підвищенню її ефективності.

Такий тип навчання може бути реалізований двома способами: послідовно або паралельно. Послідовний метод передбачає початкове навчання без учителя, а потім контрольоване навчання з учителем. Паралельний метод передбачає одночасне використання як позначених, так і непозначених прикладів у процесі навчання.

Самостійне навчання передбачає навчання моделі на допоміжному завданні, де мітки генеруються автоматично на основі вхідних даних. Метою самостійного навчання є формування моделі, здатної створювати корисні представлення даних, які згодом можуть бути використані для виконання цільового завдання. Після етапу самостійного навчання модель проходить контрольоване донавчання.

Було розроблено багато допоміжних завдань, що використовують особливості даних для автоматичної генерації міток. Наприклад, зображення можуть піддаватися випадковим модифікаціям, і завдання моделі полягає у прогнозуванні ступеня цих змін (наприклад, зміни контрастності або яскравості).

Машинне навчання знайшло широке застосування в різних галузях. Типові завдання, що виконуються алгоритмами машинного навчання, включають класифікацію, регресію, кластеризацію та зменшення розмірності. Крім того, існують специфічні завдання для окремих областей, такі як сегментація зображень, переклад тексту, синтез мовлення або генерація структур хімічних сполук.

Класифікація є одним із найпоширеніших завдань у машинному навчанні. Її мета полягає у знаходженні відображення вхідних даних x у вихід y , що визначає клас, де $y \in \{1, \dots, C\}$, а C - кількість класів.

Подібним до класифікації завданням є регресія, з тією різницею, що замість класу алгоритм повертає дійсне значення $y \in \mathbb{R}$ або значення з визначеного діапазону. Моделі для задач класифікації та регресії зазвичай навчаються під наглядом.

Кластеризація є ще одним прикладом завдання, що вирішується алгоритмами машинного навчання. Вона полягає у присвоєнні прикладу x певної групи $y \in \{1, \dots, K\}$, де K – кількість груп. Для навчання використовується нерозмічений набір даних $V_{\text{nozn}} = \{x_i\}_{i=1}^N$. Методи кластеризації групують подібні приклади в K груп на основі обраної міри подібності.

Кластеризація подібна до класифікації тим, що модель також призначає кожен приклад певній групі y . Однак, на відміну від класифікації, групи не визначаються користувачем алгоритму заздалегідь. Залежно від застосованого алгоритму кластеризації, спосіб розподілу прикладів по групах може суттєво відрізнятися. Навчання моделей для задач кластеризації здійснюється без нагляду.

Іншим класом алгоритмів машинного навчання є алгоритми зменшення розмірності. Їхньою метою є знаходження відображення вхідних даних $x \in \mathbb{R}^n$ у $y \in \mathbb{R}^m$, де $m < n$. Бажаною властивістю таких алгоритмів є здатність генерувати виходи y , що містять релевантну інформацію про приклад, водночас ігноруючи нерелевантні дані, такі як шум. Ці алгоритми часто застосовуються на етапі попередньої обробки даних для підготовки до роботи інших алгоритмів машинного навчання. Зменшення кількості вимірів може допомогти покращити продуктивність моделей, прискорити навчання або підвищити їхню ефективність.

Крім того, алгоритми зменшення розмірності широко використовуються для візуалізації багатовимірних даних, де їх зводять до двох або трьох вимірів (наприклад, t-SNE, PCA). Також вони застосовуються в методах стиснення даних.

Виявлення аномалій є ще одним важливим напрямом машинного навчання, що спрямований на ідентифікацію випадків, які суттєво відрізняються від більшості даних. Один із поширених підходів полягає в моделюванні розподілу даних за допомогою функції щільності ймовірності $p(x)$ та виявленні спостережень із низькою ймовірністю. Інший підхід передбачає виявлення аномалій шляхом аналізу відстаней прикладів до інших даних, подібно до методів кластеризації.

Алгоритми виявлення аномалій знаходять широке застосування в різних сферах: у банківських системах для виявлення несанкціонованого використання кредитних карток, у комп'ютерних мережах для ідентифікації незвичайного трафіку, а також у системах електронної пошти для фільтрації спаму. Важливе значення вони мають і в промисловості, де використовуються для моніторингу справності обладнання та виробничих процесів.

Для досягнення високої ефективності виконання завдань параметри моделі слід підбирати під час навчання. Навчання здійснюється шляхом налаштування параметрів моделі для оптимізації певного показника, який відображає продуктивність виконання завдання. Вибір цього показника залежить від типу завдання: наприклад, для класифікації та регресії використовуються різні міри якості. Крім того, функція, яка використовується як цільова в процесі навчання, повинна мати відповідні властивості. Однією з важливих властивостей часто є диференційовність, що дозволяє застосовувати методи градієнтної оптимізації.

Перед початком навчання необхідно вибрати низку налаштувань моделі, обробки даних і процесу навчання, які називаються гіперпараметрами. Прикладами гіперпараметрів є швидкість навчання, кількість і тип шарів нейронної мережі, а також розмір пакета (batch size).

Можна класифікувати наступні категорії гіперпараметрів:

1. Архітектурні гіперпараметри:

– кількість шарів,

- кількість нейронів у кожному шарі,
- типи шарів (Dense, Dropout, Conv, LSTM тощо),
- функції активації (ReLU, Tanh, ELU, Swish тощо).

2. Параметри навчання:

- learning rate,
- оптимізатор (SGD, Adam, RMSprop),
- batch size.
- кількість епох

3. Параметри регуляризації:

- dropout rate,
- L1 / L2-регуляризація (weight decay),
- early stopping.

Оптимізація гіперпараметрів – це один із ключових етапів розробки ефективних моделей машинного навчання, зокрема нейронних мереж. Незалежно від архітектури (будь то прості багат шарові перцептрони, згорткові або рекурентні мережі), правильний підбір гіперпараметрів може суттєво підвищити якість моделі, зменшити ризик перенавчання й пришвидшити збіжність. Основні методи оптимізації гіперпараметрів наведені у табл. 2.7.

В подальшому дослідженні була застосована оптимізація гіперпараметрів з використанням Bayesian Optimization. Байєсівська оптимізація (Bayesian Optimization) — це потужний метод для автоматичного підбору гіперпараметрів моделей машинного навчання, зокрема й нейронних мереж. Вона особливо корисна, коли:

- функція втрат складна, не має аналітичного вигляду або є "шумною";
- обчислення кожного варіанту параметрів — тривале (тренування моделі займає години);
- гіперпараметри є неперервними або категоріальними (наприклад: learning rate, кількість шарів, тип активації тощо).

Основні методи оптимізації гіперпараметрів

Джерело: розроблено автором

Основні методи оптимізації гіперпараметрів	Опис	Переваги	Недоліки
Grid Search (сітковий пошук)	Це один із найпростіших і найпоширеніших підходів. Усі можливі комбінації обраних значень гіперпараметрів перебираються у фіксованій сітці	• Простота реалізації • Паралелізація	• Експоненціальне зростання кількості комбінацій із кількістю параметрів • Не враховує взаємозв'язки між параметрами • Може втрачати час на малозначущі комбінації
Random Search	Замість повного перебору випадково вибираються комбінації параметрів з заданого діапазону.	• Ефективніший, ніж Grid Search, особливо при великій кількості параметрів • Простота реалізації • Дає змогу знайти хороші параметри навіть за обмеженої кількості спроб	• Випадковість: немає гарантії, що буде знайдено оптимум • Ігнорує минулі результати (не навчається на попередніх помилках)
Bayesian Optimization	Це розумніший підхід, що створює модель для апроксимації функції втрат і вибирає наступну точку для обчислення на основі ймовірності покращення.	• Менше ітерацій • Баланс між дослідженням (exploration) і уточненням (exploitation)	• Погано масштабується для великої кількості параметрів • Складніший у реалізації

Основні методи оптимізації гіперпараметрів	Опис	Переваги	Недоліки
Методи на основі еволюційних алгоритмів (Genetic Algorithm, CMA-ES)	Еволюційні алгоритми імітують природний добір. Комбінації параметрів розглядаються як «особини», які «еволюціонують» на основі фітнес-функції (наприклад, точність моделі)	- Працюють у складних, нерегулярних просторах - Не вимагають градієнтів або припущень щодо гладкості	- Повільне збіження - Потребують багато обчислювальних ресурсів
Hyperband та Successive Halving	Це сучасні методи, що оптимізують використання обчислювальних ресурсів, запускаючи моделі на невеликій кількості епох і відсіваючи найгірші ще до завершення повного тренування	- Ефективні при великій кількості варіантів - Працюють із частковими результатами (не чекають повного тренування)	Потрібне вміння зупиняти тренування й оцінювати «на льоту»

Опис роботи Байєсівської оптимізації показано на рис. 2.2.

Лінійна регресія є одним із найпростіших алгоритмів машинного навчання. Вхідними даними для моделі є вектор x , на основі якого модель генерує вихідне дійсне значення y .

Моделю лінійної регресії описується рівнянням:

$$y = \theta^T x \quad (2.7)$$

де: θ – вектор параметрів моделі.

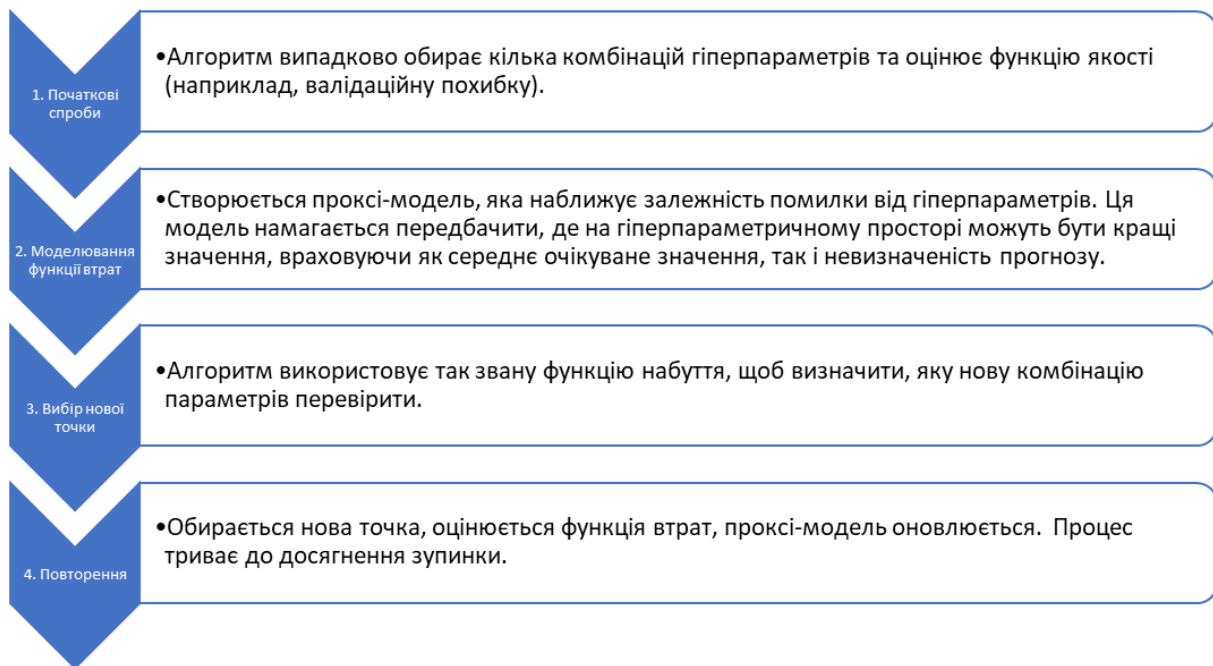


Рис. 2.2. Опис роботи Байєсівської оптимізації

Джерело: розроблено автором

Під час навчання моделі значення шести параметрів обираються таким чином, щоб мінімізувати передбачувану міру помилки. У задачах регресії найчастіше використовується середньоквадратична помилка (MSE), яка характеризує здатність моделі генерувати відповіді, максимально наближені до очікуваних. Якщо відповіді, згенеровані моделлю, повністю збігаються з очікуваними відповідями з набору даних, середньоквадратична помилка дорівнює нулю.

Оскільки модель, виражена як лінійна функція, і середньоквадратична помилка є диференційовними, для мінімізації похибки можна застосовувати методи градієнтної оптимізації. Метод лінійної регресії настільки простий, що розв'язок задачі оптимізації можна отримати аналітично за такою формулою:

$$\theta = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2.8)$$

де: θ – вектор параметрів моделі, X – матриця навчальних прикладів, y – вектор очікуваних відповідей.

На практиці аналітичне рішення застосовується лише для оптимізації моделей низької складності, наприклад, у випадках лінійної регресії або опорних векторів (SVM). У складніших моделях, де аналітичне розв'язання неможливе, зазвичай використовуються ітераційні числові методи оптимізації. Прикладом такого методу є алгоритм стохастичного градієнтного спуску (SGD), який застосовується як для навчання простих моделей, так і для тренування складних нейронних мереж.

Алгоритм SGD є ітераційним і оновлює значення параметрів на кожній ітерації згідно з наступним рівнянням:

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \eta \nabla_{\theta} L(\theta_n) \quad (2.9)$$

де: θ_n, θ_{n+1} – вектори параметрів на n -й та $n+1$ -й ітераціях відповідно, n – коефіцієнт навчання (learning rate), $\nabla_{\theta} L(\theta_n)$ – градієнт цільової функції по параметрах на ітерації n .

Бажаною властивістю моделей машинного навчання є здатність генерувати правильні відповіді для прикладів, які не використовувалися під час навчання. Ця здатність називається генералізацією або узагальненням. Висока продуктивність, виміряна на даних, що використовувалися під час навчання, не гарантує, що модель правильно відповідатиме на нові дані. Із процесом узагальнення пов'язані концепції недонавчання та перенавчання моделі. Недонавчання проявляється у низькій продуктивності моделі, виміряній на навчальному наборі. Зазвичай це пов'язано з використанням моделі, ємності якої недостатньо для вирішення завдання з наявним обсягом даних. Модель із занадто малою потужністю не здатна відтворити складні функції, необхідні для якісного виконання завдання.

Перенавчання моделі призводить до високої продуктивності на навчальному наборі, але до низької продуктивності на тестовому наборі. У такому випадку узагальнюючі можливості моделі обмежені. Моделі високої ємності мають схильність до перенавчання через здатність надмірно точно

пристосовуватися до навчальних даних. Це небажано, оскільки модель починає включати в процес прийняття рішень нерелевантну інформацію, таку як шум вимірювання. Можливості моделі слід адаптувати до складності завдання та характеристик доступного набору даних. Правильний вибір ємності моделі допомагає уникнути як перенавчання, так і недонавчання. На практиці перенавчання є набагато складнішою проблемою для вирішення. Для її подолання були розроблені методи регуляризації – модифікації, внесені до алгоритму навчання, які спрямовані на зменшення помилки узагальнення моделі [34]. До найбільш поширених методів регуляризації належать: зміна ємності моделі, регуляризації L1 та L2, метод відсіву (dropout), рання зупинка (early stopping) та доповнення даних (data augmentation).

Вибір структури нейронної мережі є складною проблемою. Кількість шарів, кількість нейронів у кожному шарі та вибір функції активації мають значний вплив на ефективність нейронної мережі. Складніша структура дозволяє реалізувати складні математичні функції, але водночас збільшує схильність моделі до перенавчання і ускладнює процес навчання. Крім того, складніша модель підвищує обчислювальні вимоги, що призводить до довшого часу навчання та генерації відповідей. Вибір структури може здійснюватися вручну або автоматично за допомогою алгоритмів вибору архітектури (пошук нейронної архітектури).

Навчання нейронної мережі схоже на навчання менш складних моделей, таких як лінійна регресія. Зазвичай використовувані цільові функції та структури нейронних мереж є диференційованими, що дає змогу застосовувати методи градієнтної оптимізації. Градієнт відносно параметрів обчислюється методом зворотного поширення, який ґрунтується на ланцюговому методі обчислення похідних. Отриманий градієнт використовують у методах градієнтної оптимізації. Найпоширенішим методом навчання нейронних мереж є стохастичний градієнтний спуск (SGD).

2.3. Розроблення сценаріїв цифрового супроводу обстежень і алгоритмізації інженерно-технологічних рішень у процесах відновлення будівель і споруд

Глобальні інфраструктурні проекти потребують покращеного управління та технологічних інновацій, причому методологія BIM є ключовою інновацією для цифрових та кіберфізичних рішень. За оцінками [113], протягом 15 років відбудеться подвоєння витрат на так звані інфраструктурні мегапроекти. На жаль, як показує той же аналіз, майже 98% цих проектів завершуються із запізненням (середня затримка становить приблизно 20 місяців) і зі значним перевиконанням передбачуваного бюджету (збільшення до 80% від початково запланованої суми). Причин такого стану справ багато, але одна з найважливіших – низька продуктивність будівельної галузі в усьому світі. Найкраще про це свідчать невдалі інвестиції в традиційне та консервативне будівництво в державному секторі.

Наприклад, будівництво берлінського аеропорту Бранденбург було заплановано ще в 1991 році. Однак реалізація почалася після 15 років проектування. Інвестиції планувалося завершити в жовтні 2011 року [115]. Потім цю дату багато разів переносили, а у звіті за 2017 рік зазначено, що затримка може сягнути навіть 2021 року. Витрати на будівництво в Німеччині зросли втричі з 2 мільярдів євро до 7,3 мільярда євро, коли уряд створив цифрову будівельну платформу для розробки національних стратегій BIM і впровадження BIM у державні інвестиції.

Управління інформацією про будівлю – це інтелектуальний та ефективний багатовимірний інструмент, який використовується для управління інформацією про будівельні об'єкти. Це управління інформацією генерується за допомогою певного програмного забезпечення, розробки 3D-моделей об'єктів та управління їх активами. Наразі основна увага підходу BIM зосереджена на 3D-моделюванні, тому його зазвичай називають інформаційним моделюванням

будівель, але BIM – це набагато більше, ніж просто інструмент 3D-моделювання; це спільний процес, який передбачає створення та управління цифровими представленнями фізичних і функціональних характеристик проекту. Ці цифрові моделі використовуються для прийняття рішень протягом життєвого циклу проекту. BIM, за своєю суттю, є методологією.

У цивільному будівництві серед багатьох класифікацій типів конструкцій існує специфічний поділ на кубічні та лінійні конструкції (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Приклад кубічних і лінійних об'єктів [83]

Перший передбачає будівництво будівель, в яких важливий їх об'єм, тобто кубатура. Найчастіше це різні типи будівель, незалежно від їх призначення. Ці об'єкти, порівняно з лінійними, є скоріше точковими і характеризуються відносно невеликою займаною площею, яка може вимірюватися в метрах. Жоден просторовий вимір не є домінуючим. Виняток становлять лише так звані хмарочоси, тобто надвисокі будівлі, у яких вертикальні розміри значно перевищують розміри в плані. Однак у випадку

лінійних об'єктів завжди домінує один вимір – його довжина, яка домінує у випадку інфраструктурних проєктів, особливо доріг і мостів.

Спостерігаючи за розвитком методології BIM, очевидно, що останнім часом BIM з'явився в інфраструктурних проєктах (тобто дороги, залізниці, мости та тунелі [124, 125]). У випадку з мостами це породило Bridge Information Management (BrIM), який є підкласом BIM.

Специфіка мостів і BrIM пов'язана як із засобами програмування, які використовуються для підготовки моделей BrIM, так і з пристроями та машинами, що використовуються під час будівництва (геодезичні прилади та дорожньо-будівельна техніка). Для управління цими даними використовуються геоінформаційні системи, які повинні будуть мати чітко визначений зв'язок з BIM-моделлю об'єкта, що будується (рис. 2.4). Крім того, BrIM сприяє співпраці між різними компонентами будівництва мостів, зокрема для підтримки виявлення зіткнень, покращення візуалізації за допомогою 3D-моделей та інтеграції з інструментами управління проєктами. Ці інструменти додатково оснащені функціями для детального моніторингу мостів, структурного аналізу, послідовності будівництва та планування технічного обслуговування. Таким чином, специфіка BrIM підтримує етап експлуатації за допомогою інструментів для управління об'єктами, моніторингу стану здоров'я, планування реконструкції та моніторингу енергоефективності.

У цифровому світі мости перетворюються зі статичних методів будівництва на послуги, що забезпечують багатовимірне з'єднання: фізичні – спільноти та цифрові – дані. Ця трансформація є результатом вимог менеджерів мостів і необхідності забезпечення безпеки та комфорту користувачів мостів. Ця система управління забезпечує підключення та інтеграцію мостів у більш синхронний цифровий вимір, особливо в отриманні, обробці та обміні даними. Тепер система керування мостами дозволяє мостам співпрацювати з іншими об'єктами, щоб розширити можливості глобального цілісного управління та створити цифрові мережі розумних інфраструктур.



Рис. 2.4. Порівняння технологій BIM та BrIM

Джерело: розроблено автором

В останні роки BIM став найбільш процвітаючою технологією в будівельній індустрії, що сприяло її поширенню на інженерну інфраструктуру. Ця технологія є перспективним підходом, який можна використовувати для проектування, будівництва та управління об'єктами споруд, де цифрове представлення процесу будівництва використовується для полегшення обміну та взаємодії інформації. Застосування BIM призводить до зниження витрат, контролю якості та підвищення ефективності протягом усього життєвого циклу проекту. Дослідження [31], проведене Стенфордським університетом, підкреслило потенційні переваги інструментів BIM у будівельних проектах. Згідно з цим опитуванням, впровадження BIM здатне пом'якшити вплив 40% додаткових змін, знизити ціни контрактів на 10% шляхом виявлення та вирішення конфліктів і скоротити тривалість проекту на 7%. Завдяки цим перевагам BIM також був прийнятий комерційним програмним забезпеченням, таким як Autodesk Revit, ArchiCAD і Allplan [31]. Крім того, BIM був успішно реалізований у багатьох проектах мостів та інших цивільних інженерних проектів і управління. Однак його застосування на етапі обслуговування

почалося порівняно пізно. Макгуайр і Атадеро використовували BIM для управління перевіркою та оцінки інформації. Abudayyeh і Al-Battaineh прийняли інформаційну модель побудованого мосту для технічного обслуговування та управління. Подібним чином деякі дослідницькі роботи також поєднували BIM із традиційною системою управління для підвищення ефективності обслуговування [126, 127]. Такі дослідження дійшли висновку, що використання цифрових інструментів, особливо технології BIM, дозволяє системам управління мостами стандартизувати та підтримувати мости, а також процеси обробки даних об'єктів.

Найважливішою метою методології BIM є збір, розробка та управління інформацією про будівельні об'єкти. Ця інформація зазвичай зберігається в інформаційних моделях BIM і може надходити з багатьох різних джерел. При плануванні нових об'єктів BIM-модель створюється і розвивається під час створення проекту, а потім послідовно оновлюється і доповнюється в процесі будівництва та управління. У випадку об'єктів, які були спроектовані та побудовані до впровадження та використання методології BIM, необхідно використовувати інші методи для отримання всіх даних, необхідних для створення моделі.

Цифрові технології не лише підвищують ефективність цілих галузей, але й приносять користь і на менших масштабах. BIM вже доведено як інструмент, що надає цілий ряд комерційних переваг. Центр цифрових технологій Британії в «The Gemini Principles» [116] зазначив, що BIM забезпечить «нові ринки, нові послуги, нові бізнес-моделі, нових учасників». BIM, як технічна інновація, розглядається як експортний продукт, що підвищує конкурентоспроможність внутрішнього ринку. Така ж логіка застосовується і до Digital Twin (DT) на міждисциплінарному рівні. Для економічного розвитку промисловості необхідно сприймати технологічний прогрес і використовувати його. Це особливо вірно, коли інновації є всесвітніми розробками, такими як цифрові близнюки.

Цифровий двійник – це ІТ-модель, яка відтворює фізичний об'єкт, враховуючи весь його життєвий цикл. Він використовує дані з історії пристрою та експертну інформацію, щоб звітувати про його технічний стан і оптимізувати час або витрати, виконуючи обчислення та створюючи робочі сценарії.

Розвиток і все більш широке використання цифрових двійників є результатом міждисциплінарного підходу до інженерії та досягнень ІТ-технологій, зокрема асиміляції різноманітних структур даних, машинного навчання, високої продуктивності моделювання в реальному часі та можливостей візуалізації процесів. Ця технологія також є основою промислової версії Інтернету речей, де фізичні об'єкти можуть існувати та взаємодіяти віртуально з іншими машинами та людьми. У цьому контексті їх називають «кібероб'єктами» або «цифровими аватарами», а цифровий двійник може бути елементом концепції кіберфізичної системи (CPS) [128, 129].

Цифрові близнюки можуть допомогти в управлінні інфраструктурними активами. Однак варто зазначити, що інтеграція виникає через потребу саме в управлінні активами: електронні реєстри ресурсів, процеси деградації чи покращення, що відбуваються в них, розвиток бази знань про ресурси та обробка даних, зібраних під час перевірок або з систем моніторингу, можуть бути реалізовані у формі цифрового двійника. Так, він може імітувати мережу об'єктів дорожньої або залізничної інфраструктури. У міру розвитку такого близнюка ми можемо оптимізувати роботу мережі, підлаштовуючись під різні сценарії. Це полегшує менеджерам прийняття рішень щодо планування заходів з технічного обслуговування та встановлення бюджету на експлуатацію, реконструкцію чи заміну об'єктів.

Цифровий двійник може взаємодіяти з іншими системами та використовуватися для перевірки й тестування системи до її фактичного встановлення. Він збирає, відстежує та аналізує дані життєвого циклу для покращення експлуатації та технічного обслуговування в довгострокових

стратегіях управління активами. Крім того, безпеку та надійність транспортних систем можна оцінити за допомогою цифрових двійників, як це відбувається у роботі сучасних залізничних стрілочних переводів. Завдяки поєднанню даних, записаних датчиками на реальних об'єктах, з їхніми цифровими моделями, цифровий двійник набуває нового значення. Інженерна діяльність стає ще більше орієнтованою на людину. Цифровий двійник – це віртуальне представлення реального об'єкта чи системи протягом усього життєвого циклу. Завдяки рішенням, які надають такі технології, як Інтернет речей, можна використовувати дані, отримані з вихідного об'єкта, майже в режимі реального часу. Існує кілька потенційних сфер застосування цифрових близнюків.

1. Моделювання на етапі проектування: Дизайнери можуть використовувати мультигалузеві цифрові моделі для складного міждисциплінарного моделювання, що дозволяє швидко та недорого створювати прототипи нових проектів. Така інтеграція моделей у цифровий двійник дозволяє майбутнім користувачам брати участь без інженерного досвіду, враховуючи впливи, такі як статичні та динамічні навантаження, шум, вплив навколишнього середовища, взаємодія людей, освітлення тощо.

2. Логістика доставки та контроль руху: Відстеження запасів у реальному часі та автоматизація доставки відповідають поточному попиту на будівельному майданчику, який також може мати свого цифрового двійника. Це також включає приклади регулювання дорожнього руху в містах і прості рішення для міських паркувальних мереж, які пропонують розташування доступних місць.

3. Оперативна діяльність у сфері надійності та безпеки: Зв'язок цифрових моделей із моніторингом технічного стану. Цифрові двійники можуть стати наступним етапом у розвитку систем SHM (Structural Health Monitoring). Вони дозволяють операторам швидко реагувати та зменшати ризик збоїв і загроз. У таких рішеннях можна використовувати машинне навчання для

прогнозування та виявлення аномалій, а також запроваджувати автономні алгоритми прийняття рішень, що усуває потенційні людські помилки.

Концепція цифрового двійника в контексті мостових конструкцій може бути особливо ефективною для моделювання змін технічного стану мосту та відображення процесів, що відбуваються у ньому. Зокрема, автори публікації [117, 130] запропонували дві взаємопов'язані моделі цифрових двійників (рис. 2.5). Одна з них – це цифрова BIM-модель, яка називається Digital Twin Model (DTM), а друга – модель, створена за допомогою інструментів зворотного проектування (reverse engineering). У цьому випадку реконструкція здійснюється за допомогою методів фотограмметрії та лазерного сканування. Така модель отримала назву Reality Twin Model (RTM), оскільки завдяки можливості циклічного повторення процесу реконструкції можна фіксувати поточний стан 3D-геометрії конструкції та характеристики поверхні компонентів об'єкта. Результати кожної наступної реконструкції порівнюються з останньою версією моделі RTM, і на цій основі створюється автоматичний звіт, що містить виявлені відмінності, які можуть свідчити про наявність пошкоджень.

Процес порівняння моделей стосується обох основних типів моделей – DTM та RTM. Для цього використовуються попередньо визначені маркери, які були закріплені на фактичній конструкції мосту ще до першого сканування. Крім того, ці моделі мають бути доповнені аналітичною моделлю FEM, яка використовується для оцінки впливу виявлених пошкоджень на несучу здатність та інші функціональні характеристики конструкції. Наприклад, якщо виявлені дефекти, деградація або порушення суцільності матеріалу (тріщини), параметри моделі KE змінюються шляхом зменшення моменту інерції, зміни модуля пружності або введення специфічних нелінійностей.

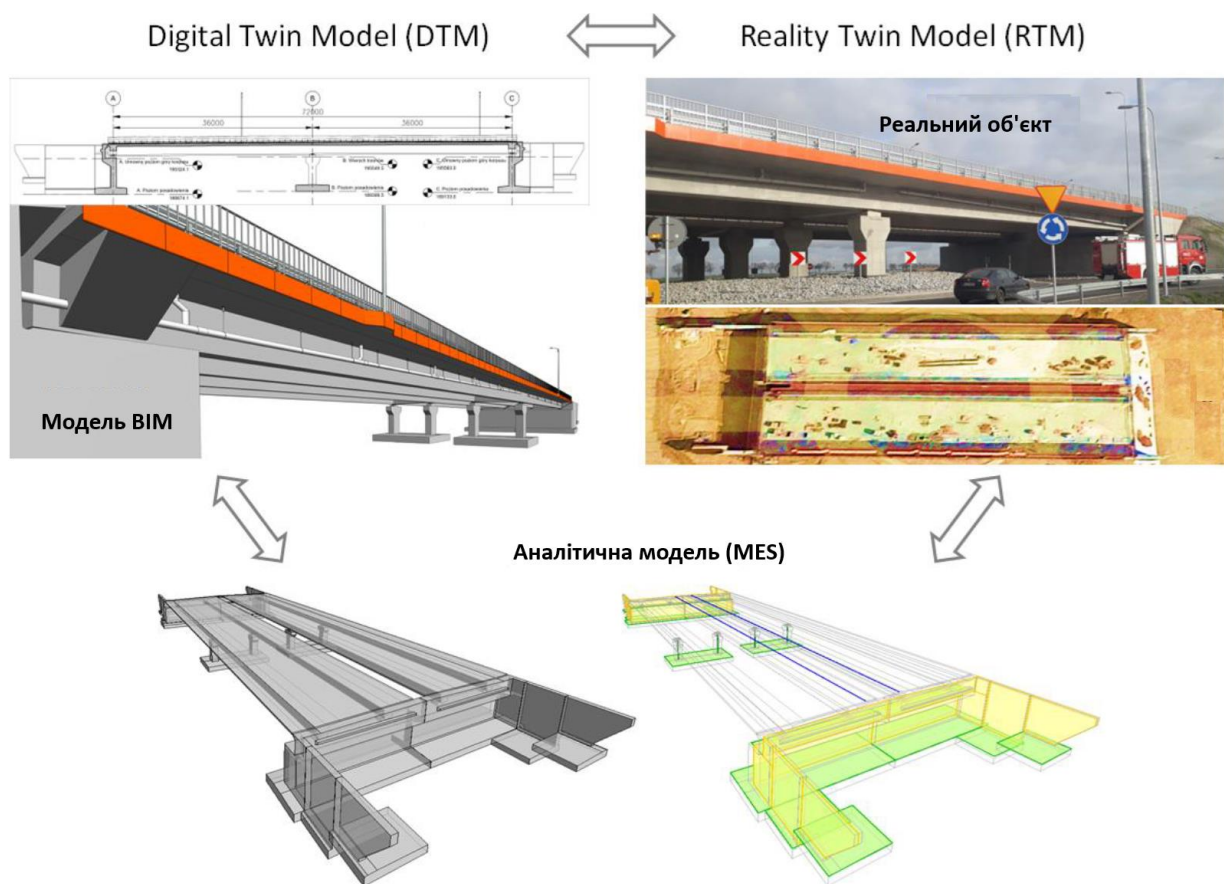


Рис. 2.5. Поняття цифрового двійника моста згідно з [117]

Цифровий двійник реального мостового об'єкта може імітувати поведінку свого фізичного аналога за умови, що користувач (власник або менеджер) має доступ до даних, зібраних протягом життєвого циклу, що можуть включати історію навантажень, кліматичні явища, переїзди великих транспортних засобів або процеси деградації. Таким чином, цифровий двійник стає сховищем даних і базою знань, що є важливою складовою комплексної перевірки, моніторингу технічного стану та стратегії прийняття рішень. На поточному етапі розвитку цифрові двійники вже можуть використовуватися для підвищення безпеки та надійності інфраструктури. Певною мірою вони також сприятимуть покращенню якості нових, запланованих об'єктів. Однак їх створення та використання все ще пов'язано з високими витратами, що зумовлені необхідністю збирання та експлуатації складних електронних систем,

а також збором, обміном і обробкою великих обсягів даних. Тому необхідно створювати платформи, які об'єднують різні інструменти, середовища, моделі та формати для запису і обміну інформацією.

На підставі досліджень другого розділу здійснено пошук загально-методичного підґрунтя до формування системи оцінювання технічного стану будівельних конструкцій. Пошук загально-методичного базису дослідження пов'язано з декомпозицією процесів оцінки технічного стану (ОТС) в складі проєкту відновлення. Щодо стадії ОТС здійснено декомпозицію на підготовчі, інструментальні, аналітичні та управлінські процедури. Це дозволило сформулювати методичну основу для науково обґрунтованого оновлення оцінки технічного стану будівельного об'єкту - як частини проєкту відновлення.

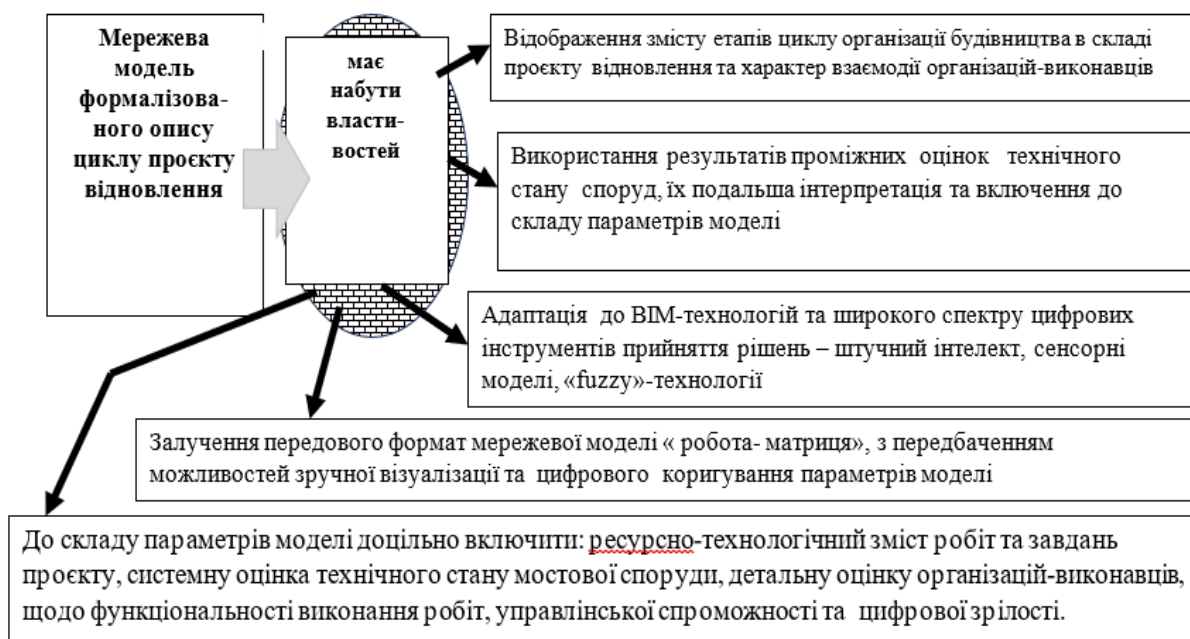


Рис. 2.6. Схема пошуку формату організаційно-технологічної моделі формалізованого опису проєкту відновлення

Висновки до розділу 2.

1. Аналіз міжнародного досвіду засвідчив, що ефективний моніторинг технічного стану мостових конструкцій є критично важливим елементом забезпечення їхньої експлуатаційної безпеки, довговічності та оптимізації витрат на обслуговування. У країнах із розвинутою інфраструктурою (зокрема,

США, Японії, Німеччині, Велика Британія) спостерігається тенденція до впровадження систем моніторингу стану конструкцій (SHM – Structural Health Monitoring), які базуються на поєднанні сенсорних технологій, безперервного збору даних, аналітичного моделювання й методів штучного інтелекту. Такий підхід дозволяє не лише фіксувати поточний стан конструкцій, а й прогнозувати розвиток пошкоджень у часі, що істотно підвищує рівень превентивного технічного обслуговування. Крім того, практики міжнародного моніторингу вказують на важливість створення єдиних цифрових баз даних і стандартів для уніфікації оцінювання технічного стану споруд у масштабах національних інфраструктур.

2. Порівняльний аналіз міжнародного досвіду свідчить про наявність різних стратегій і підходів до моніторингу мостів, що зумовлені специфікою кліматичних, технічних, економічних та управлінських умов у різних країнах. Була представлена концепцію BMS, як цінна технологія для обслуговування та моніторингу мостів, що сприяє покращеній співпраці між інженерами та менеджерами інфраструктури. Детально розглянуто переваги цієї системи, зокрема зручний інтерфейс і ефективну координацію роботи. У межах BMS здійснено всебічний аналіз традиційних методів оцінювання технічного стану мостів із наголосом на їхні обмеження. Серед яких – тривалість та трудомісткість перевірок, що проводяться за допомогою ручних інструментів. Крім того, ці методи створюють загрози для безпеки інспекторів, особливо під час обстеження зношених або важкодоступних елементів мостів. Доведено, що міжнародна практика вказує на доцільність переходу від епізодичних інспекцій до безперервного моніторингу, а також на потребу державної політики підтримки інновацій у цій сфері, що може слугувати орієнтиром для удосконалення української системи технічного нагляду за мостами.

3. Застосування інноваційних технологій штучного інтелекту у сфері інфраструктурного моніторингу дозволяє суттєво підвищити ефективність процесу оцінювання технічного стану мостів. Алгоритми машинного навчання

та комп'ютерного зору здатні оперативно обробляти великі обсяги даних із сенсорів, відеокамер, дронів або BIM-моделей, виявляючи навіть незначні ознаки пошкоджень, деформацій або зношення конструкцій. На відміну від традиційних методів інспекції, які потребують значних людських ресурсів і часу, системи на основі ШІ забезпечують безперервний моніторинг у реальному часі, мінімізуючи вплив людського чинника та ймовірність пропущених дефектів. Таким чином, інтелектуальні підходи не лише підвищують точність оцінки, а й сприяють своєчасному виявленню загроз для безпеки мостів, що є критично важливим у контексті сучасних вимог до надійності транспортної інфраструктури.

4. Аналіз основних тенденцій розвитку транспортних систем свідчить про те, що їх еволюцію можна охарактеризувати як ускладнення конструктивних рішень за одночасного спрощення експлуатаційних процесів. Водночас ключовим завданням експлуатації інженерних споруд є забезпечення їх стійкості до агресивних зовнішніх впливів, що мають складну імовірнісну природу. З огляду на високу складність сучасних інженерних споруд, передбачити всі можливі експлуатаційні ситуації під час розрахунку й проектування практично неможливо, тим більше, що ці ситуації можуть змінюватися в процесі експлуатації. Крім того, у процесі використання споруд непередбачувано змінюються як властивості матеріалів, так і параметри зовнішніх впливів, а також інші фактори, що супроводжують експлуатацію. У конструкціях виникають і розвиваються дефекти та пошкодження різного характеру, які негативно позначаються на їхньому технічному стані. Численні дослідження та публікації свідчать про активний інтерес науковців та практиків до використання штучного інтелекту в системі моніторингу технічного стану мостів. Використання штучного інтелекту для моніторингу технічного стану мостів є доцільним і має багато переваг. Це дозволяє підвищити ефективність моніторингу, забезпечує точність оцінки стану транспортних споруд, прогнозує можливі пошкодження, покращує планування технічного обслуговування та

ремонту. Саме тому для забезпечення надійної роботи як нових, так і наявних транспортних споруд необхідно впроваджувати сучасні системи обстеження та оцінювання технічного стану з використанням технологій штучного інтелекту. Це дасть змогу своєчасно вживати заходів для гарантування безпечної експлуатації в умовах змінного середовища. На підставі цього було удосконалено підхід до класифікації експлуатаційних станів елементів будівель і споруд, який передбачає п'яти-рівневу градацію – від справного до непрацездатного стану. Така класифікація забезпечує підвищення точності оцінювання технічного стану конструкцій, сприяє своєчасному прийняттю управлінських рішень та формує основу для підвищення надійності, довговічності й безпеки експлуатації інженерних об'єктів у рамках девелоперських проєктів відновлення.

5. Провідний результат досліджень другого розділу дисертаційної роботи – оновлена та суттєво вдосконалена загально-методична основа організаційно-технологічного забезпечення процесів формалізації та опису оцінки технічного стану будівель і споруд у діджитал-адаптованому середовищі сучасного будівництва. Запропонований підхід передбачає інтеграцію BIM-моделювання, інструментів штучного інтелекту та цифрових систем підтримки прийняття рішень, що створює єдину платформу для комплексного оцінювання, прогнозування та управління технічним станом об'єктів, у тому числі критичної інфраструктури. Запропоновано методичний підхід щодо використання одного з найбільш ефективних та популярних інструментів ШІ, а саме штучних нейронних мереж для вирішення завдання оцінки технічного стану мостових конструкцій. ШНМ є потужними моделями машинного навчання, здатними навчатися робити прогнози або виконувати інші завдання, адаптуючи ваги своїх вузлів відповідно до навчальних даних. Запропоновано проведення процедури оптимізації гіперпараметрів ШНМ, що може суттєво підвищити якість моделі, зменшити ризик перенавчання й пришвидшити збіжність. Для оптимізації гіперпараметрів була застосована Bayesian

Optimization, яка є ефективним інструментом для зниження часу тривалості навчання моделі та обчислення кожного варіанту параметрів.

6. Аналіз ключових цифрових технологій, що застосовуються в інформаційному моделюванні мостів, засвідчує, що сучасне BIM-середовище стало ядром інтеграції різноманітних інженерних інструментів і даних, необхідних для всіх етапів життєвого циклу мостової споруди. Використання таких технологій, як параметричне моделювання, геоінформаційні системи (ГІС), лазерне сканування та фотограмметрія, забезпечує не лише високу точність цифрових моделей, а й створює умови для ефективної координації між фахівцями різного профілю. Інформаційна модель моста поступово трансформується із статичного проєктного інструмента на динамічну цифрову платформу, здатну акумулювати дані про конструкцію, матеріали, навантаження та стан об'єкта в реальному часі. Це відкриває нові можливості для автоматизованого прийняття рішень і переходу до концепції «цифрового двійника».

РОЗДІЛ 3

АНАЛІТИЧНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ФОРМАЛІЗОВАНОГО ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЄКТУ ВІДНОВЛЕННЯ СПОРУД У ЦИФРОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ БУДІВЕЛЬНОГО ДЕВЕЛОПМЕНТУ, З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

3.1. Оцінка достовірності компонент інтелектуальних інформаційних систем на об'єктах транспортної та громадської інфраструктури в контексті завдань оцінювання технічного стану будівельних конструкцій в складі проєктів відновлення

Моніторинг стану мостової конструкції, який привернув значну увагу в останні десятиліття, відіграє важливу роль у мережах транспортної інфраструктури. Він забезпечує цілісність та безпеку експлуатації, виявлення потенційних структурних ризиків для запобігання аваріям і дозволяє приймати проактивні рішення щодо управління активами та графіків технічного обслуговування [131, 132]. Переваги довгострокових систем моніторингу стану мостів (SHM), що працюють при постійному навантаженні, полягають у можливості «віддаленого» спостереження за проблемними конструкціями завдяки функції сигналізації. Вони дозволяють відстежувати зміни або «ефекти постійних навантажень» з часом, такі як зростання тріщин або нахил (обертання) опор, фіксувати проїзди вантажівок на швидкості шосе, аналізувати величини та цикли втомних навантажень, а також використовувати меншу кількість датчиків.

Існує безліч технологій для систем SHM існуючих мостів, залежно від типів структурних датчиків, інтелектуальної обробки даних, управління, комунікацій та інтелектуальних систем раннього попередження. Крім того, розроблено ключові методи застосування SHM на основі вібрацій для запису

динамічних відгуків мостів, які аналізуються за допомогою методів ОМА, методів SSI, алгоритмів FFT, оновлення моделей FE. Переваги цих методів можуть надати корисну інформацію для кращого розуміння вимірної поведінки конструкції під навантаженням.

На сьогодні в системах моніторингу технічного стану мостів (SHM) доступні різні інструменти Інтернету речей (IoT), кожен із яких має свої переваги. До таких інструментів належать різноманітні інтелектуальні датчики, які описано нижче (рис.3.1).

1. Мікроелектромеханічні системи (MEMS) – це мікропристрої, обладнані численними сенсорами. Вони можуть бути вбудовані в різні елементи конструкції моста для визначення таких параметрів, як корозія арматурних стрижнів та ниток попереднього напруження.

2. Наносенсори, які широко використовуються в інженерії та медицині, можуть застосовуватися в SHM для моніторингу руйнування матеріалів і механізмів тріщиноутворення. Це дає змогу своєчасно виявити потенційні слабкі місця й запобігти можливим аваріям.

3. Волоконно-оптичні датчики – оптимальне рішення для моніторингу конструкцій мостів, особливо в зонах, схильних до утворення тріщин. Такі сенсори зручні у використанні, багаторазові, надійні навіть після механічного пошкодження. Вони забезпечують точні показники при вимірюванні деформацій, вібрацій, тиску, напруги та змін температури.

4. П'єзокерамічні датчики – це сенсори-актуатори, здатні виявляти пошкодження в елементах конструкцій. Під час збудження вони вібрують, генеруючи електричний струм, пов'язаний із жорсткістю та демпфувальними властивостями структури.

5. Акустичні датчики – ідеальні для моніторингу напружено-деформованого стану магістральних канатів і кабелів у мостах різного типу (фермових, підвісних, вантових). Забезпечують реальний моніторинг появи ознак пошкоджень.

6. Магнітопружні датчики – використовуються для дистанційного визначення власної частоти конструкції, можливого виникнення резонансних явищ, величин напруг, параметрів в'язкості та перевантаження. Вони характеризуються високою чутливістю, стійкістю до навантажень, надійністю, швидкою реакцією, широким діапазоном частот і економічною ефективністю.

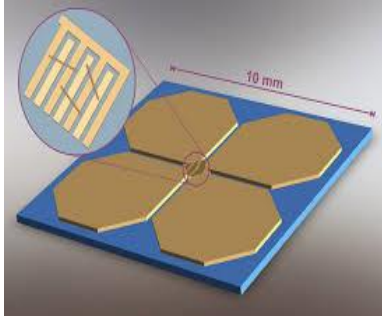
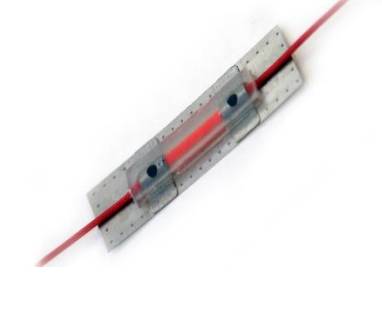
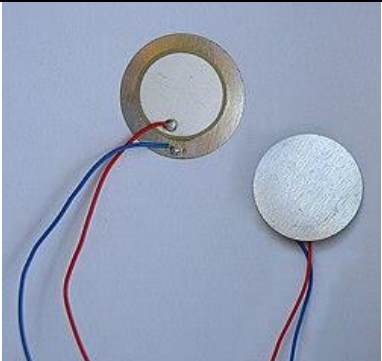
		
Мікроелектромеханічні системи (MEMS)	Наносенсори	Волоконно-оптичні датчики
		
П'єзокерамічні датчики	Акустичні датчики	Магнітопружні датчики

Рис. 3.1. Інтелектуальні датчики, що використовуються в системах моніторингу технічного стану мостів. Джерело: розроблено автором

Вибір оптимальної технології сенсорного моніторингу для SHM залежить від таких критеріїв, як функціональність системи, довговічність, простота монтажу, здатність до точного моніторингу реакції конструкції, а також суворість експлуатаційних умов. Основна мета – розробити практичну

технологію моніторингу, що передбачає мінімальне використання кабельних з'єднань, просте встановлення, легке обслуговування чи заміну, доступність та прийнятну вартість у порівнянні з традиційними методами інспекції, виключаючи необхідність фізичної присутності на об'єкті.

Часові та фінансові обмеження на етапі монтажу можуть суттєво впливати на ефективність системи моніторингу. Економічно вигідні сенсорні технології зазвичай мають термін експлуатації від 5 до 10 років. Віддалений або моніторинг у реальному часі реалізується за допомогою кількох датчиків, об'єднаних у цифрову мережу для обробки даних: запису, фільтрації, аналізу, оцінки результатів та прийняття рішень. Під час періодичного моніторингу зібрані дані передаються до керуючого блоку як дротовими, так і бездротовими каналами. Залежно від стану мосту, збір і аналіз даних можуть проводитися після серйозних інцидентів або в режимі реального часу – особливо у випадках потенційних втомних пошкоджень, що виникають у критичних елементах конструкції.

Обробка (очищення) даних – це критично важливий процес, що потребує професійної підготовки інженерів керуючого блоку. Вона також може бути реалізована через спеціалізоване програмне забезпечення для аналізу. Аналогічно важливим є стиснення даних, особливо коли йдеться про аналіз зміни параметрів протягом усього строку служби мосту.

Розробка та впровадження бездротового датчика на основі технологій Інтернету речей (IoT) для моніторингу стану мостів охоплює створення бездротових сенсорних мереж, розробку комунікаційних рішень і методів передачі даних. Основні компоненти такої системи включають:

1. Проектування та інтеграцію бездротових датчиків і шлюзів передачі даних.
2. Розробку хмарного терміналу відповідно до протоколів IoT.
3. Організацію польового монтажу, а також планування розміщення датчиків і шлюзів відповідно до конструктивних особливостей системи

моніторингу стану мостів (SHM), що гарантує автоматичний збір даних датчиками та їх передачу на хмарну платформу через локальний шлюз.

Керування подібними системами може здійснюватися за допомогою смартфонів або планшетів, однак режим розробника доступний лише у веб-версії програмного забезпечення. Тому доцільно спочатку створити веб-платформу, після чого встановити з'єднання між датчиками та цією платформою.

Існує декілька підходів до розгортання мостових датчиків, які базуються на даних попередніх досліджень, специфіці польових умов, структурних вимогах, а також на досвіді інспекторів, результатах аналізу методом скінченних елементів (FEA), критеріях максимізації інформаційної матриці Фішера (FIM), оцінці коефіцієнтів коваріаційної матриці та енергетичних підходах.

Найчастіше для проєктування систем SHM використовують результати аналізу FEA та експертні висновки розробників. На їх основі визначається оптимальне розташування та кількість датчиків, необхідних для ефективного моніторингу технічного стану конструкцій у ключових точках мосту.

У межах цього етапу передбачено розробку системи управління даними для збору та автоматичної передачі вимірювальної інформації на хмарну платформу, з урахуванням відповідних протоколів і методик. Для цього створено графічний інтерфейс користувача та схему вимірювання, які підключаються до бездротових датчиків. Надалі система може працювати онлайн через веб-платформу.

Зв'язок між датчиками та платформою реалізується за допомогою спеціально розробленого програмного коду й алгоритмів. Передбачено можливість створення універсального коду для всіх типів датчиків, із вбудованим API та доменом веб-платформи. Цей код завантажується на інформаційну панель веб-додатку, забезпечуючи з'єднання через Інтернет.

Після успішного встановлення зв'язку датчики SHM-системи відображаються онлайн на інформаційній панелі. У подальшому можна активувати автоматизовану функцію збору даних, що запускає процес моніторингу в реальному часі. Це дозволяє керівникам мостів безперервно оцінювати технічний стан споруд через хмарну платформу протягом усього терміну їх експлуатації.

Технології SHM широко застосовуються в численних міждисциплінарних дослідницьких галузях, зосереджених на моніторингу стану конструкцій, оцінці їх «здоров'я» та життєвого циклу. Це особливо актуально для цивільних споруд та інфраструктури з потенційним промисловим застосуванням. Останні досягнення й інновації стосуються як інтелектуального управління даними про надзвичайні ситуації в режимі реального часу, так і сучасних вимог до обслуговування. Вони активно впроваджуються у високотехнологічні стратегії, зокрема Virtual BrIM, Інтернет речей (IoT), Web of Things і Industry 4.0.

Дані з датчиків збираються, обробляються та передаються на веб-сервер для інтерактивного відображення як поточної інформації, так і історичних структурних подій. Ці дані візуалізуються у веб-картографічному сервісі, в якому положення датчиків і конструкцій інтегруються у віртуальну цифрову «подвійну лабораторію». Такий підхід забезпечує комплексне рішення для взаємодії з користувачами з метою моніторингу стану конструкцій [133].

Розумна система сповіщення встановлює порогові значення вібраційних сигналів на основі алгоритмів машинного навчання, що дає змогу інтегрувати її в систему SHM. У разі перевищення порогу система може надсилати сповіщення у вигляді SMS у режимі онлайн, як показано на рис. 3.2.

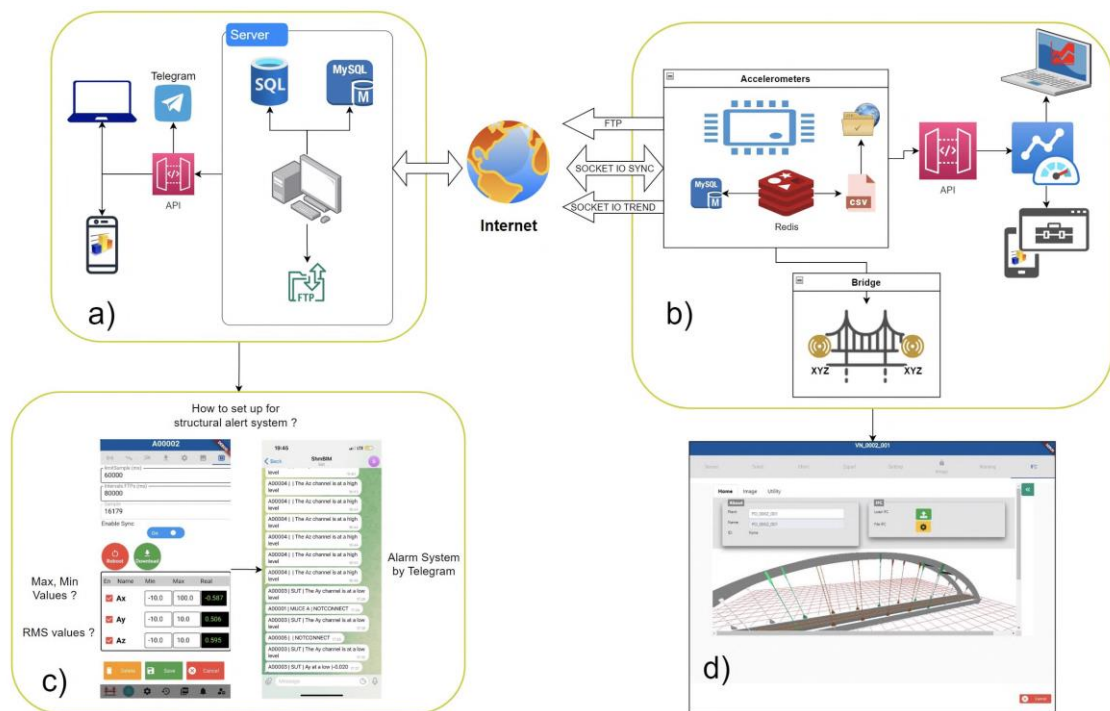


Рис. 3.2. Інтелектуальне управління даними моніторингу на основі цифрового двійника: а) інтеграція алгоритмів машинного навчання в систему моніторингу; б) вібраційна система моніторингу; в) розумна система оповіщення через SMS; д) управління даними BrIM. Джерело: розроблено автором

3.2. Моделювання процесу оцінювання технічного стану мостових споруд із застосуванням вдосконалених мережевих моделей, нечіткої логіки та інтелектуальних інформаційних систем

Показник «Оцінка мосту» було розраховано із застосуванням інструментів нечіткої логіки, реалізованих у пакеті Fuzzy Logic Toolbox програмного середовища Matlab R2014. Застосування методів нечіткої логіки зумовлене специфікою об'єкта дослідження – мостової споруди, технічний стан якої залежить від багатьох факторів, значна частина яких є якісними, суб'єктивними або недостатньо формалізованими для використання традиційних кількісних методів. Нечітка логіка – це потужний інструмент моделювання та аналізу складних систем із високим рівнем невизначеності. Її

особливість полягає в здатності працювати з нечіткими (розпливчастими) поняттями, такими як «добрий стан», «помірне зношення» чи «низький рівень зчеплення». Такі терміни важко однозначно виразити числовими величинами, але вони мають практичне значення в інженерному аналізі. Саме завдяки використанню логіки нечітких множин стало можливим перетворення експертних суджень і якісних оцінок у формалізовану модель, придатну для розрахунків. У контексті даного дослідження ключову роль відіграє фактор невизначеності, що супроводжує практично всі оцінки параметрів, які впливають на загальний технічний стан мосту. Наприклад, такі характеристики, як корозія арматури, ушкодження бетонного шару або стан деформаційних швів, рідко мають чітко визначені числові межі, а їх оцінка часто базується на інженерному досвіді та візуальних обстеженнях. Це робить класичні методи аналізу малоефективними або взагалі непридатними. У свою чергу, нечітка логіка дозволяє враховувати суб'єктивні чинники, варіативність суджень експертів і неповноту вихідних даних. Завдяки цьому можна створити модель оцінювання, що відображає реальні умови експлуатації споруд і адаптується до різних сценаріїв. Крім того, такий підхід забезпечує більшу гнучкість у прийнятті рішень щодо технічного обслуговування та пріоритезації ремонтних заходів. Отже, застосування нечіткої логіки у процесі формування показника «Оцінка мосту» не лише обґрунтоване, а й необхідне з огляду на характер досліджуваних параметрів. Вона забезпечує цілісне охоплення системи з урахуванням множинних, часто суперечливих факторів, і дозволяє уникнути спрощень, властивих традиційним методам аналізу.

В якості вхідних змінних було використано п'ять основних конструкційних елементів мосту (табл. 3.1).

Вхідні змінні до моделі Fuzzy Logic. Джерело: розроблено автором

Структурний елемент	Назва в Fuzzy Logic
Оцінка стану підбудови	Substructure
Оцінка стану надбудови	Superstructure
Оцінка стану проїзної частини	Deck
Оцінка загального структурного стану	Overall Structural
Оцінка стану русла та захисту русла	Channel Protection

На рис. 3.3 показано п'ять вхідних параметрів, кожен з яких подано як нечітку змінну. Вони з'єднані стрілками до блоку FIS, що вказує на використання всіх цих параметрів для оцінки стану мосту.

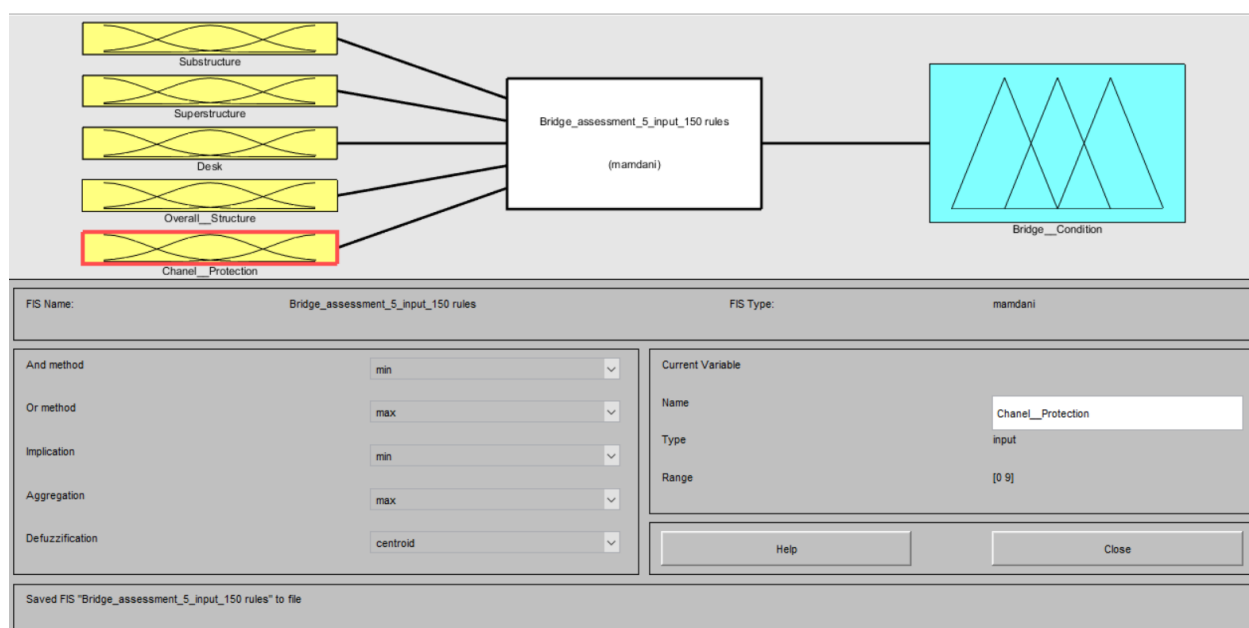


Рис. 3.3. Вхідні змінні до моделі Fuzzy Logic.

Джерело: розроблено автором

Опис вхідних параметрів показано на прикладі змінної Substructure, діапазон значень якої [0, 9] та відображається на осі X у графіку функцій належності (рис. 3.4).

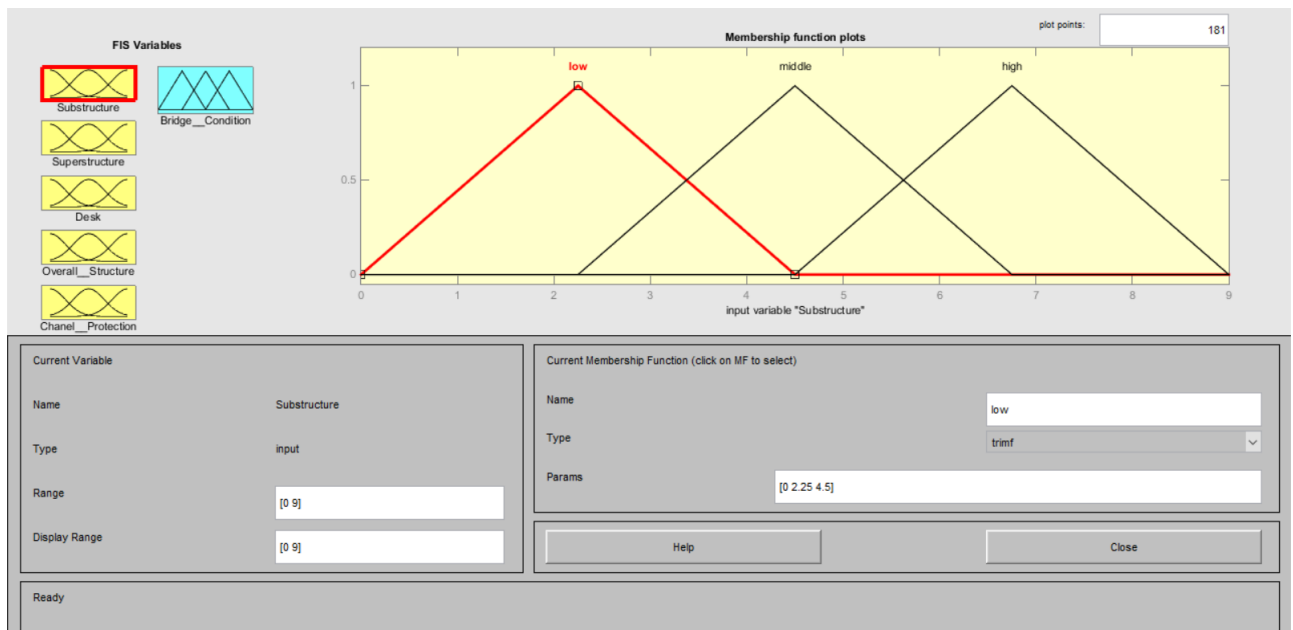


Рис. 3.4. Графічна інтерпретація змінної Substructure значення low

Джерело: розроблено автором

Данна змінна має три трикутні функції належності (trimf), що класифікують значення за лінгвістичними термами (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Параметри та значення вхідної змінної Substructure

Джерело: розроблено автором

Назва	Тип	Параметри	Графічна інтерпретація
low	trimf	[0, 2.25, 4.5]	рис. 3.4
middle	trimf	[2.25, 4.5, 6.75]	рис. 3.5
high	trimf	[4.5, 6.75, 9]	рис. 3.6

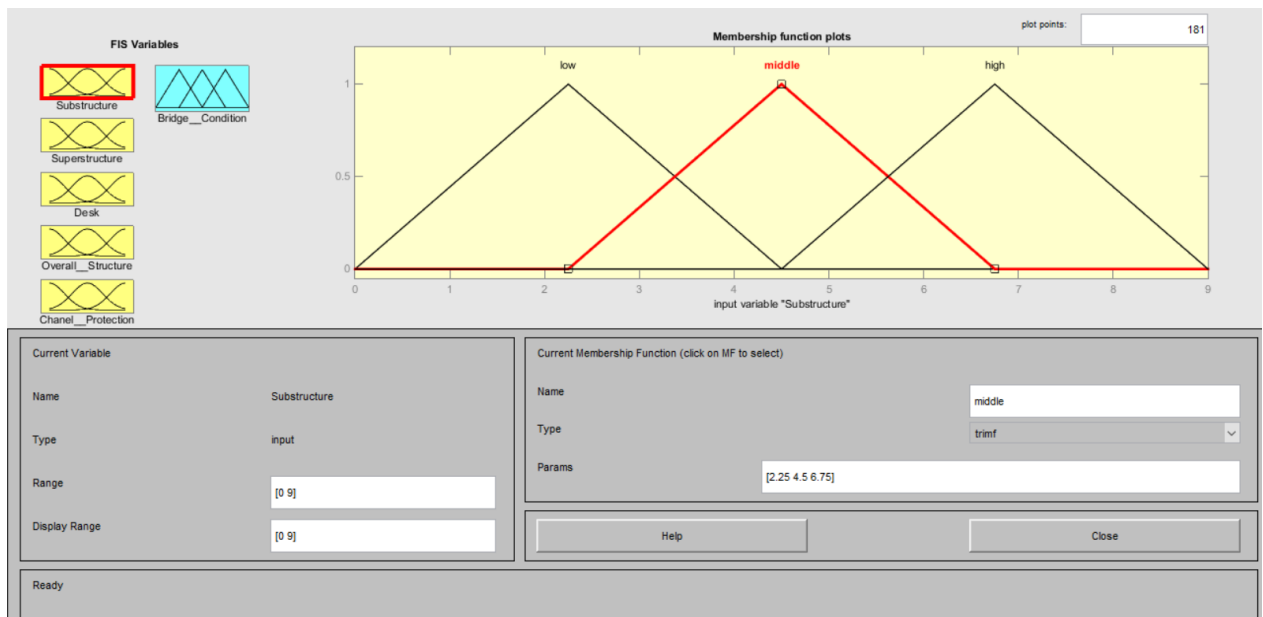


Рис. 3.5. Графічна інтерпретація змінної Substructure значення middle

Джерело: розроблено автором

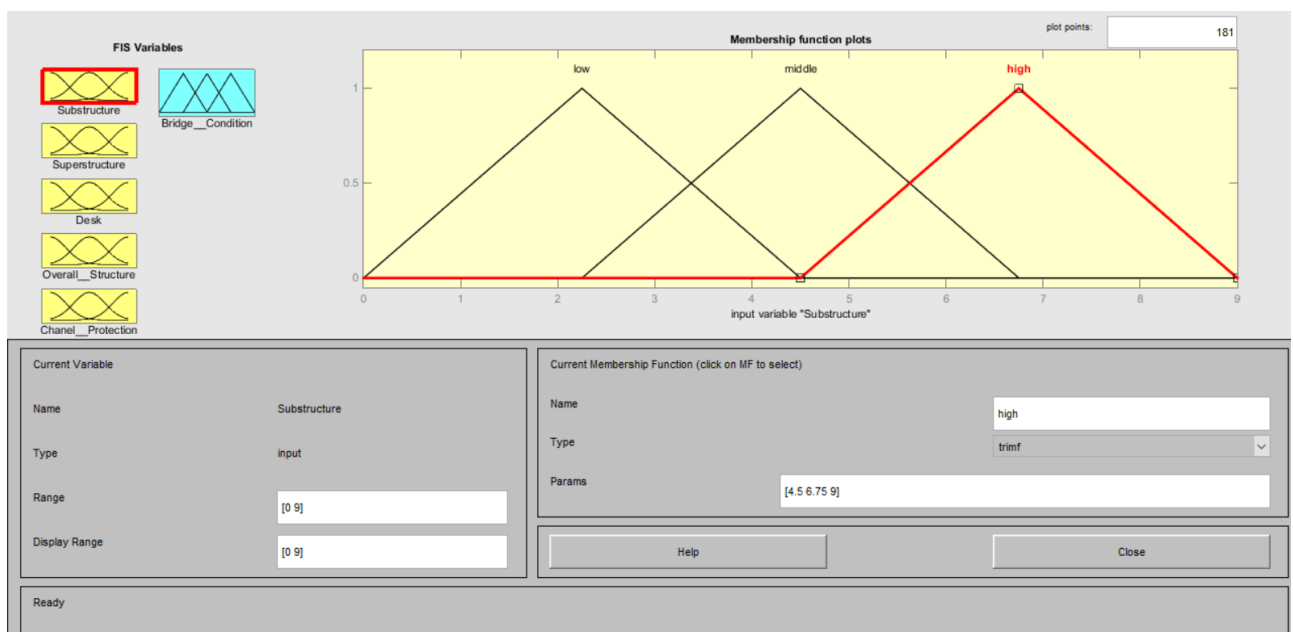


Рис. 3.6. Графічна інтерпретація змінної Substructure значення high

Джерело: розроблено автором

Це означає, що значення параметра Substructure, близькі до 2.25, інтерпретуються як "низький стан", значення 5, матиме нульову приналежність

до "low", сильну до "middle" та слабк до "high", а значення 8, матиме нульову приналежність до "low" та "middle" і сильну до "high".

П'ять вхідних параметрів визначають логіку обчислень у системі (табл. 3.3.)

Таблиця 3.3

Параметри, що визначають логіку обчислень у системі Fuzzy Logic

Джерело: розроблено автором

Параметр	Значення	Пояснення
And method	min	мінімум при об'єднанні умов «І»
Or method	max	максимум при об'єднанні умов «АБО»
Implication	min	для обчислення результату правила (IF...THEN)
Aggregation	max	злиття вихідних значень з усіх правил
Defuzzification	centroid	центр тяжіння — метод перетворення нечіткого результату в чітке значення

У процесі нечіткого висновку система перевіряє значення кожної лінгвістичної змінної за допомогою правил нечіткої логіки, перетворюючи вхідні дані на вихідну лінгвістичну змінну. Далі відбувається агрегування результатів на основі сформованих правил. Система одночасно обробляє множину правил, а потім об'єднує їх у фінальне рішення за допомогою механізму нечіткого логічного висновку. У цьому дослідженні було використано 150 правил (рис. 3.7). Застосовано метод Мамдані, який базується на логічній структурі «Якщо-Тоді» з використанням функції «І» як логічного оператора-зв'язки.

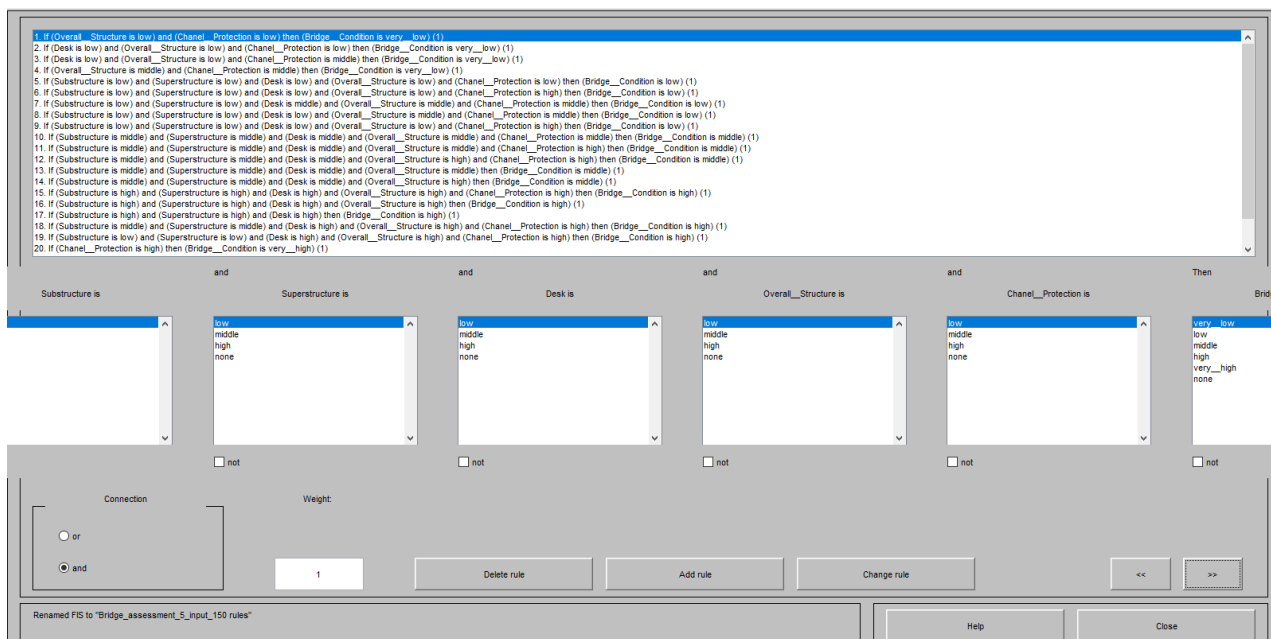


Рис. 3.7. Приклад частини бази правил (від 1 до 20)

Джерело: розроблено автором

Параметр Bridge_Condition є єдиною вихідною змінною. У правій частині видно її функції належності (сині трикутники на фоні), тобто нечіткі терми – можливо: "поганий", "середній", "хороший" стан (хоча назви не вказано явно).

Таблиця 3.4

Параметри та значення вихідної змінної Bridge_Condition

Джерело: розроблено автором

Назва	Тип	Параметри	Графічна інтерпретація
very_low	trimf	[-1.35, 0.0, 1.35]	рис. 3.8
low	trimf	[0.9, 2.25, 3.6]	рис. 3.9
middle	trimf	[3.15, 4.5, 5.85]	рис. 3.10
high	trimf	[5.4, 6.75, 8.1]	рис. 3.11
very_high	trimf	[7.65, 9, 10.35]	рис. 3.12

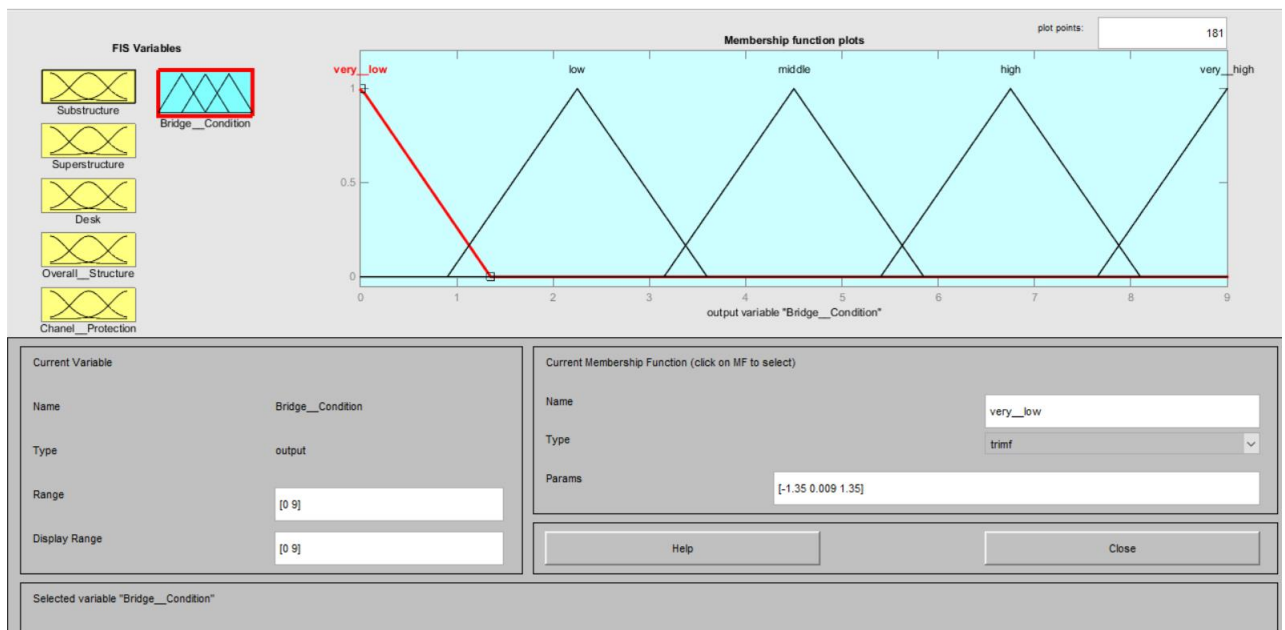


Рис. 3.8. Графічна інтерпретація змінної Bridge_Condition значення very_low

Джерело: розроблено автором

Це означає, що значення параметра Bridge_Condition, близькі до 1, інтерпретуються як "дуже низький стан".

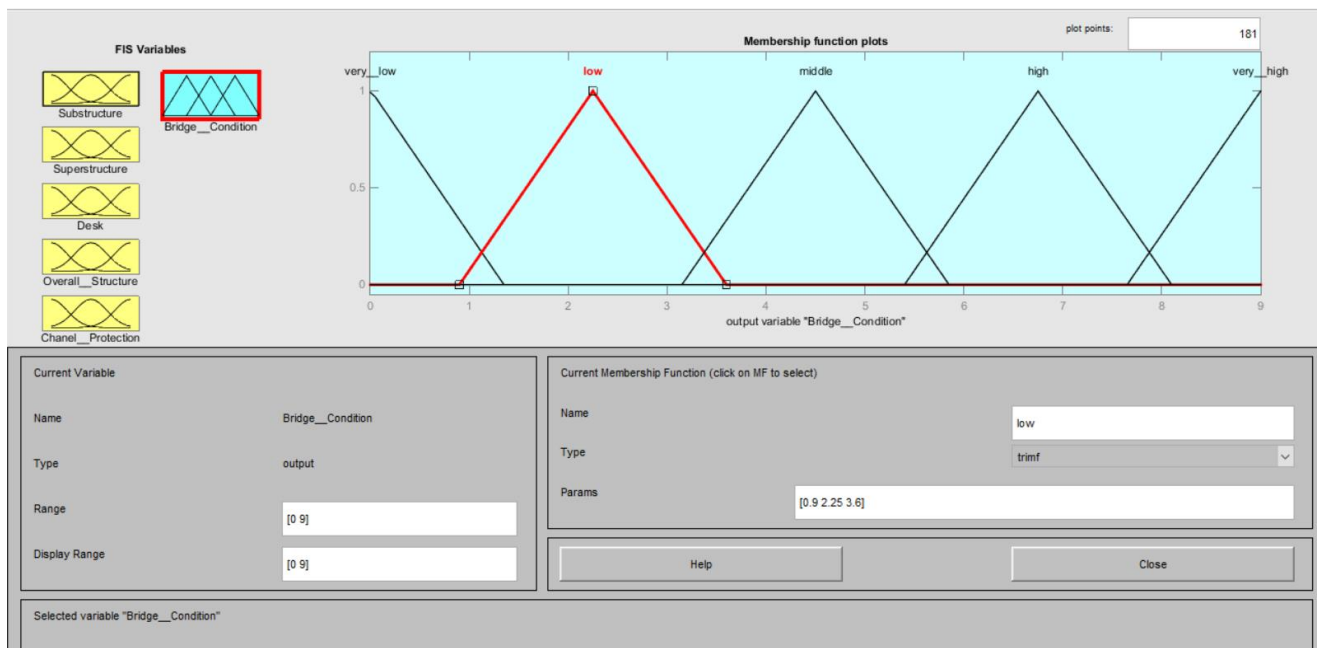


Рис. 3.9. Графічна інтерпретація змінної Bridge_Condition значення low

Джерело: розроблено автором

Це означає, що значення параметра Bridge_Condition, близькі до 2,5 , інтерпретуються як "низький стан".

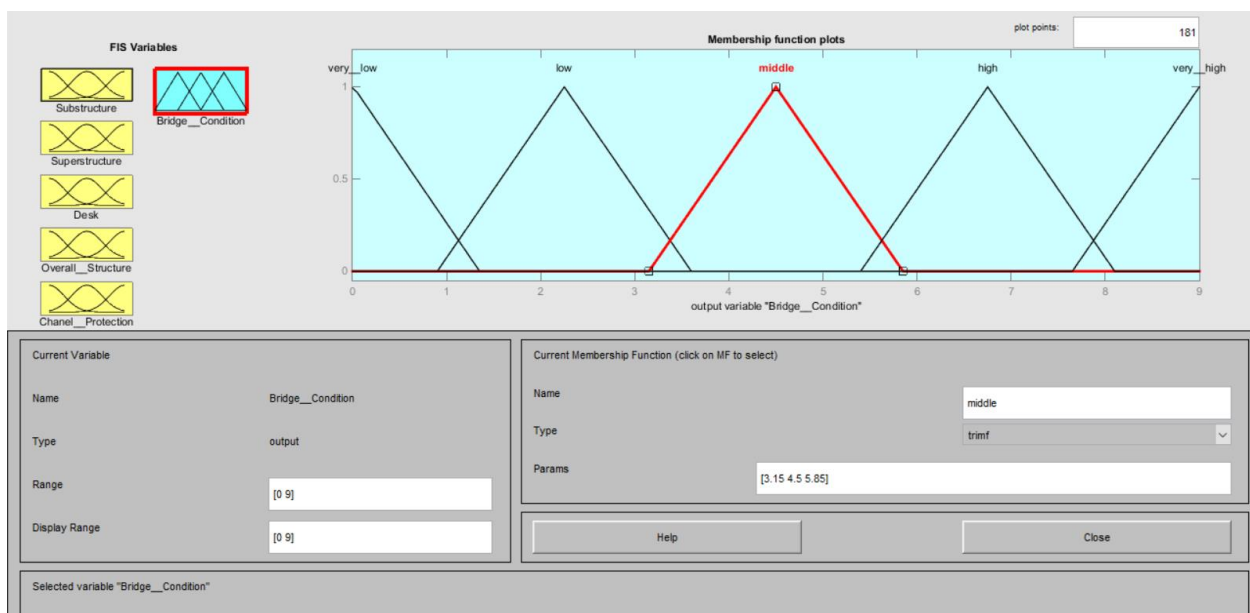


Рис. 3.10. Графічна інтерпретація змінної Bridge_Condition значення middle

Джерело: розроблено автором

Це означає, що значення параметра Bridge_Condition, близькі до 4,5, інтерпретуються як "середній стан".

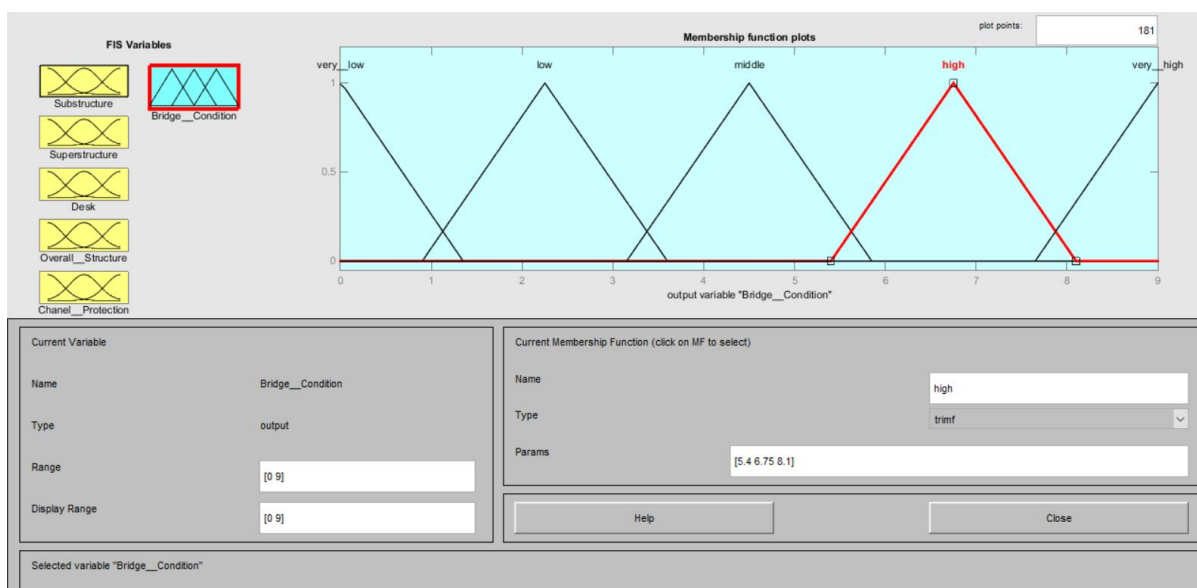


Рис. 3.11. Графічна інтерпретація змінної Bridge_Condition значення high

Джерело: розроблено автором

Це означає, що значення параметра Bridge_Condition, близькі до 7, інтерпретуються як "високий стан".

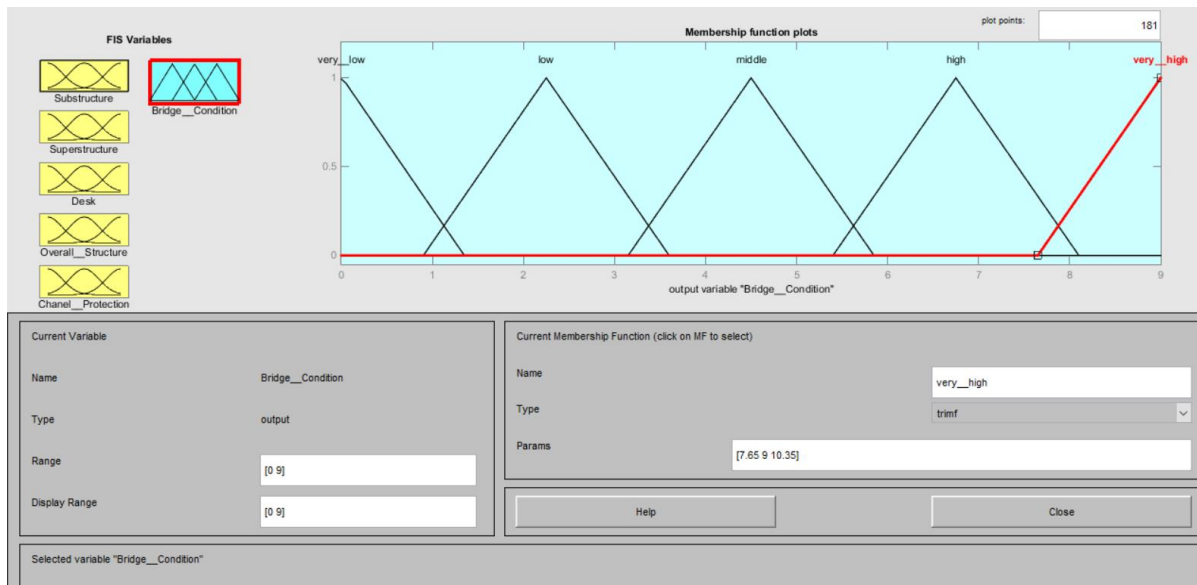


Рис. 3.12. Графічна інтерпретація змінної Bridge_Condition значення very_high

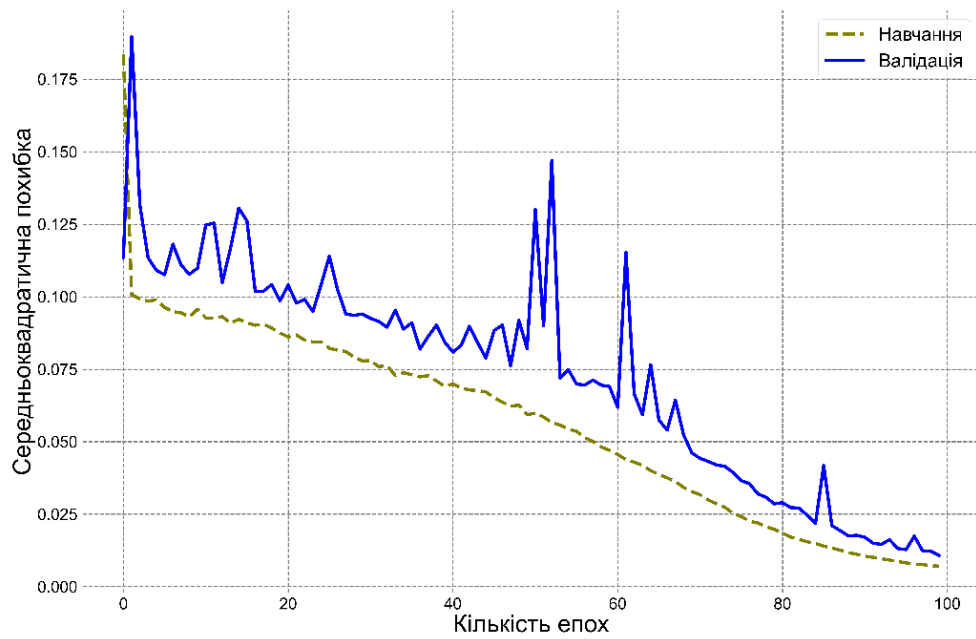
Джерело: розроблено автором

Це означає, що значення параметра Bridge_Condition, близькі до 8,5, інтерпретуються як "дуже високий стан".

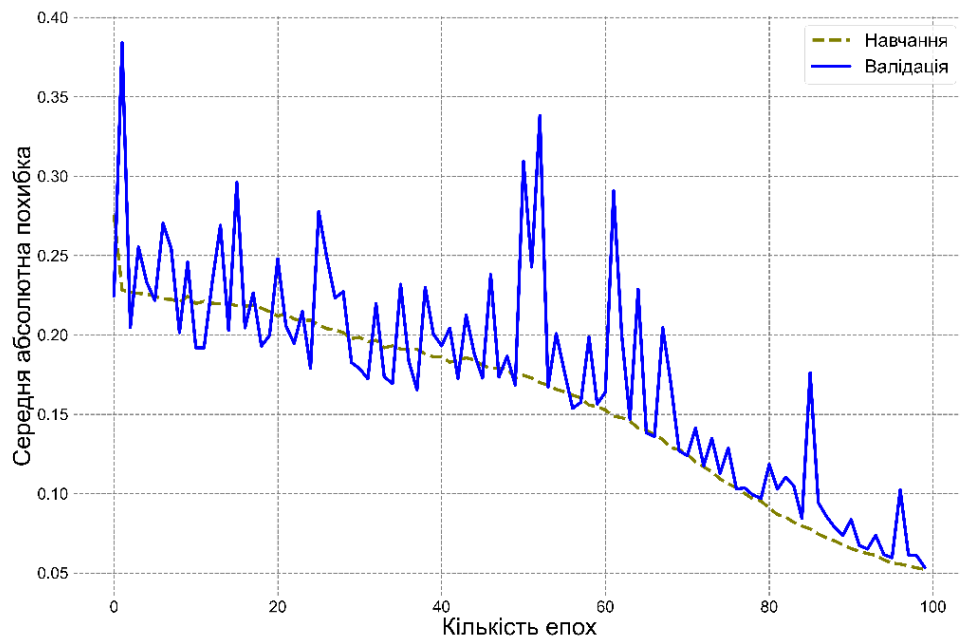
3.3. Інтеграція аналітичних складових інструментарію для його адаптації до практики обстеження та відновлення будівель і інженерних споруд

На наступному етапі дослідження було розроблено шість варіантів моделей ШНМ з однаковою архітектурою, але з різними функціями активації та алгоритмами оптимізації. Для активації застосовувалися функції sigmoid, softmax, ReLU та tanh, а для оптимізації - алгоритми SGD і ADAM.

На рис. 3.13а та 3.13б наведено результати порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) для навчального та валідаційного наборів даних моделі ШНМ1.



(а)



(б)

Рис. 3.13. Результати порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) для навчального та валідаційного наборів даних моделі ШНМ1. Джерело: розроблено автором

Рис. 3.13а демонструє розподіл середньоквадратичної похибки.
Максимальні значення становили:

- навчальна вибірка – 0,1837;
- валідаційний набір – 0,1135.

Мінімальні значення були такими:

- навчальна вибірка – 0,0071;
- валідаційний набір – 0,0123.

Рис. 3.13б ілюструє порівняння середньої абсолютної похибки.

Максимальні значення:

- навчальна вибірка – 0,2757,
- валідаційний набір – 0,2246.

Мінімальні значення:

- навчальна вибірка – 0,0532,
- валідаційний набір – 0,0609.

На рис. 3.14 представлено розподіл прогнозованих і цільових значень для моделі ШНМ1.

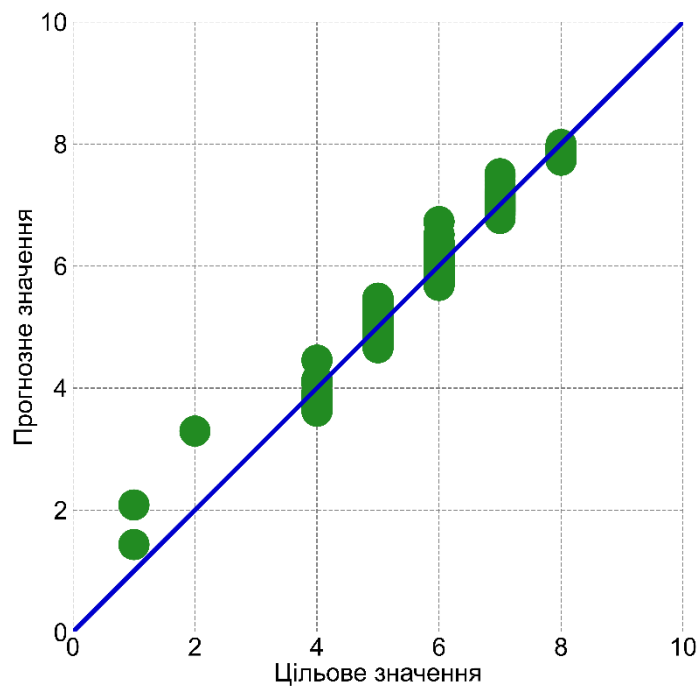


Рис. 3.14. Розподіл прогнозованих і цільових значень для моделі ШНМ1

Джерело: розроблено автором

З рисунку видно, що при малих цільових значеннях оцінки стану (1–2) модель прогнозує надто великі значення (всі точки ліворуч лежать вище синьої лінії). В середньому діапазоні (4–7) модель демонструє кращу поведінку - прогнози ближчі до істинних значень, хоча все ще спостерігається розкид. При більших цільових значеннях (8–10) прогнози є найточнішими, оскільки переважна більшість прогнозованих значень практично збігаються з лінією регресії.

На гістограмі (рис. 3.15) зображено розподіл помилок для моделі ШНМ1.

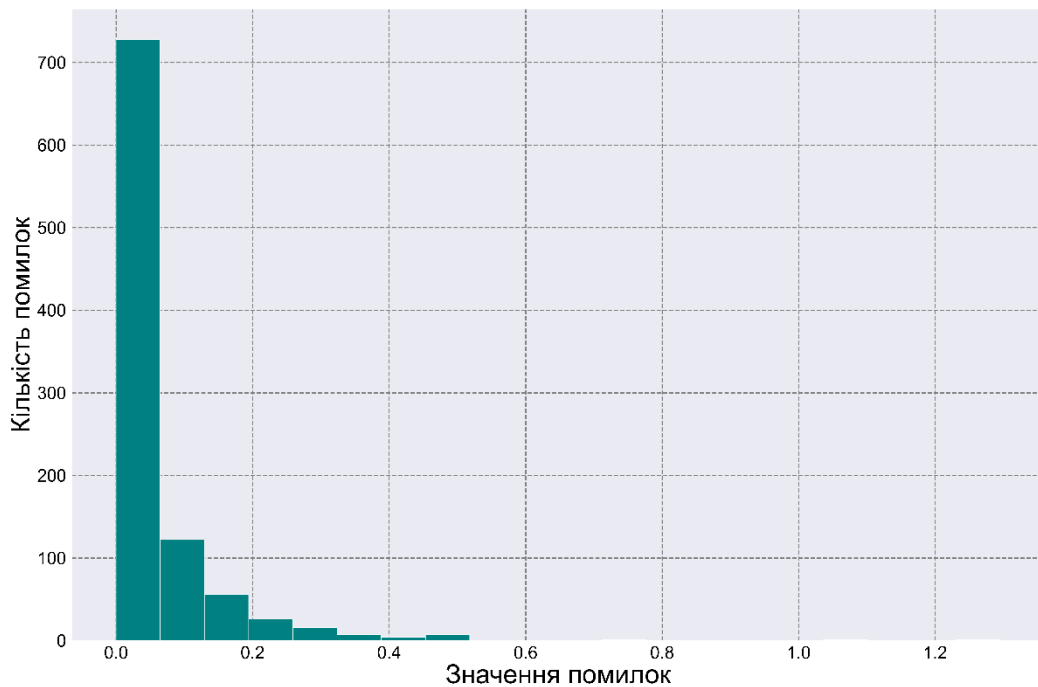
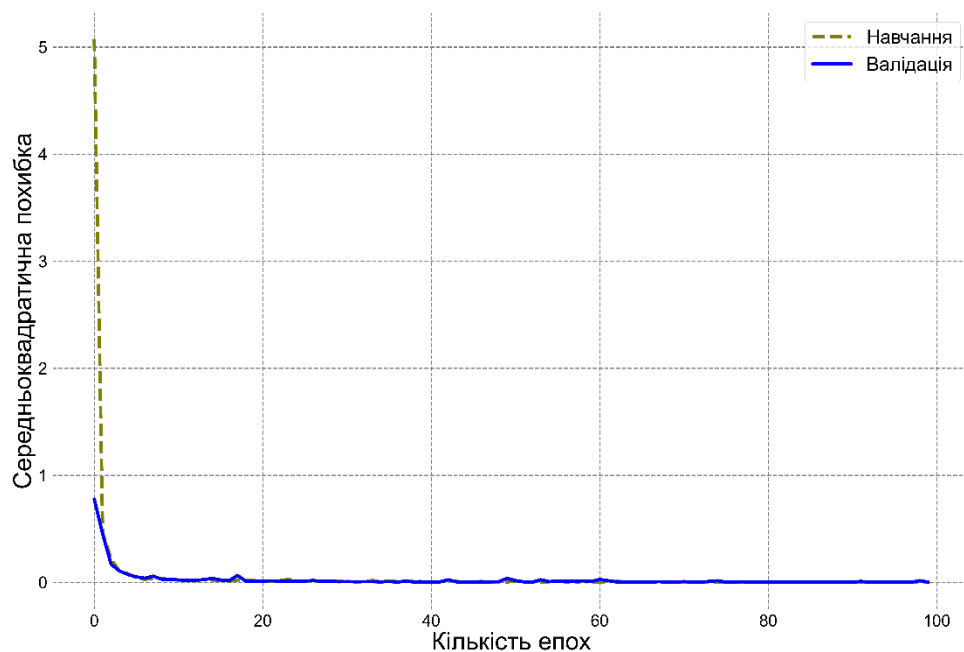


Рис. 3.15. Гістограма розподілу помилок для моделі ШНМ1

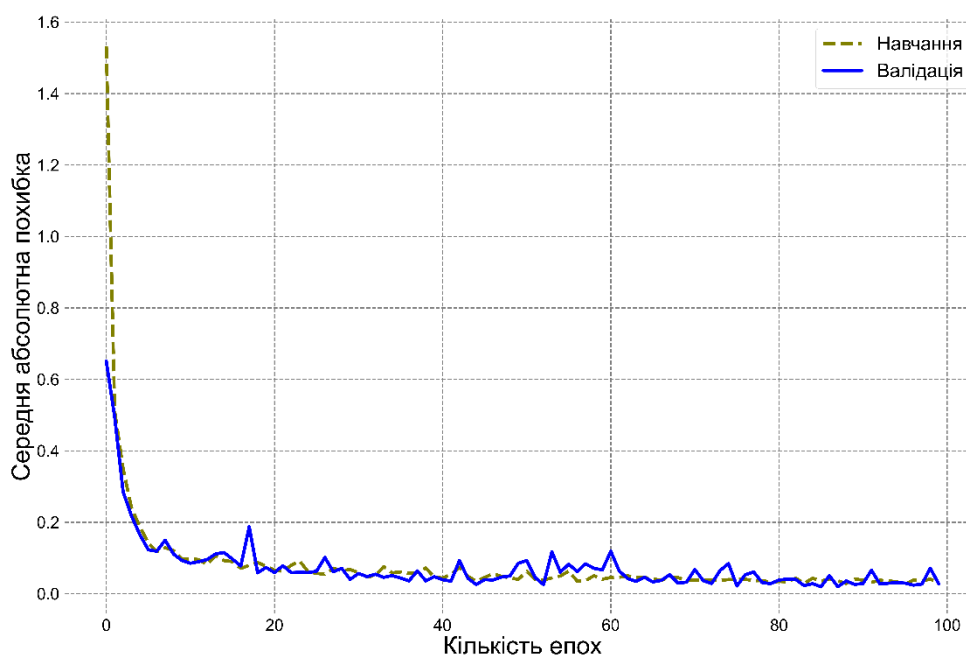
Джерело: розроблено автором

Найбільше значень припадає на помилки від 0 до 0.2, таких понад 700 випадків, що свідчить про високу точність моделі в більшості випадків. Є окремі поодинокі помилки (до 0.5). Це може свідчити про викиди (outliers) або ситуації, де модель не змогла правильно узагальнити. Розподіл скошений вправо (right-skewed), що характерно для добре навчених моделей – більшість прогнозів близькі до істини, але трапляються поодинокі промахи.

На рис. 3.16а та 3.16б наведено результати порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) для навчального та валідаційного наборів даних моделі ШНМ2.



(а)



(б)

Рис. 3.16. Результати порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) для навчального та валідаційного наборів даних моделі ШНМ2. Джерело: розроблено автором

Рис. 3.16а демонструє розподіл середньоквадратичної похибки.

Максимальні значення становили:

- навчальна вибірка – 1,4857;
- валідаційний набір – 0,1119.

Мінімальні значення були такими:

- навчальна вибірка – 0,0023;
- валідаційний набір – 0,0479.

Рис. 3.16б ілюструє порівняння середньої абсолютної похибки.

Максимальні значення:

- навчальна вибірка – 0,5695,
- валідаційний набір – 0,2389.

Мінімальні значення:

- навчальна вибірка – 0,0339,
- валідаційний набір – 0,0479.

На рис. 3.17 представлено розподіл прогнозованих і цільових значень для моделі ШНМ2.

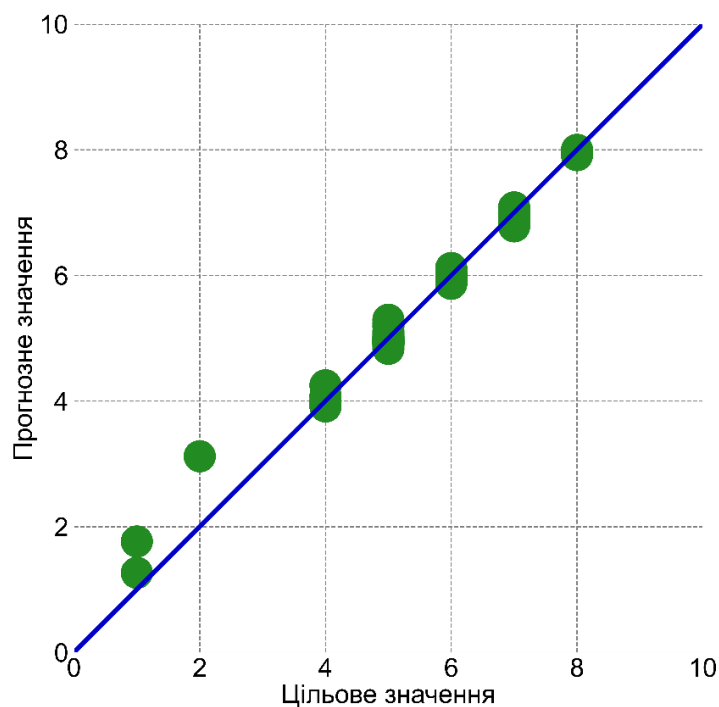


Рис. 3.17. Розподіл прогнозованих і цільових значень для моделі ШНМ2

Джерело: розроблено автором

З рисунку видно, що при малих цільових значеннях оцінки стану (1–2) модель прогнозує надто великі значення (всі точки ліворуч лежать вище синьої лінії). В середньому діапазоні (4–7) модель демонструє кращу поведінку - прогнози ближчі до істинних значень, хоча все ще спостерігається розкид. При цільових значеннях рівних 6–8 прогнози є найточнішими, оскільки переважна більшість прогнозованих значень практично збігаються з лінією регресії.

На гістограмі (рис. 3.18) зображено розподіл помилок для моделі ШНМ2.

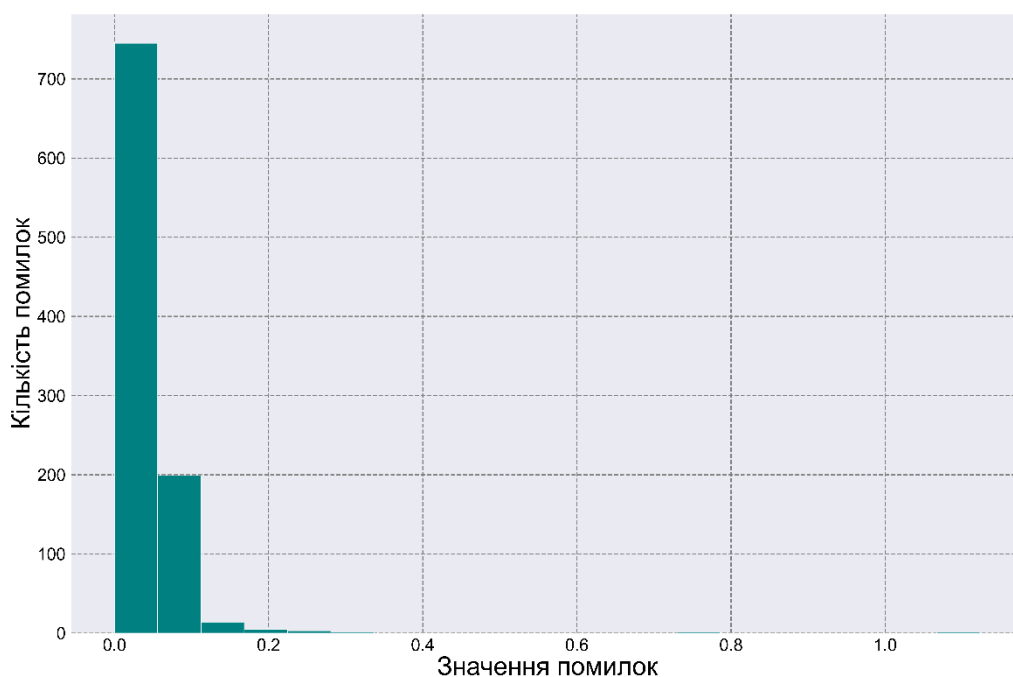
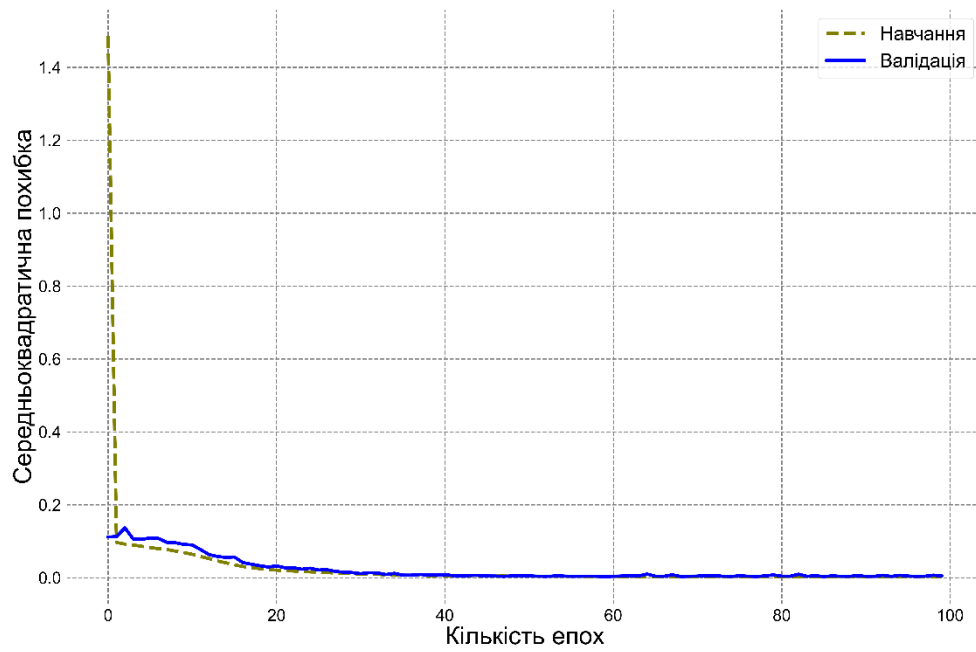


Рис. 3.18. Гістограма розподілу помилок для моделі ШНМ2

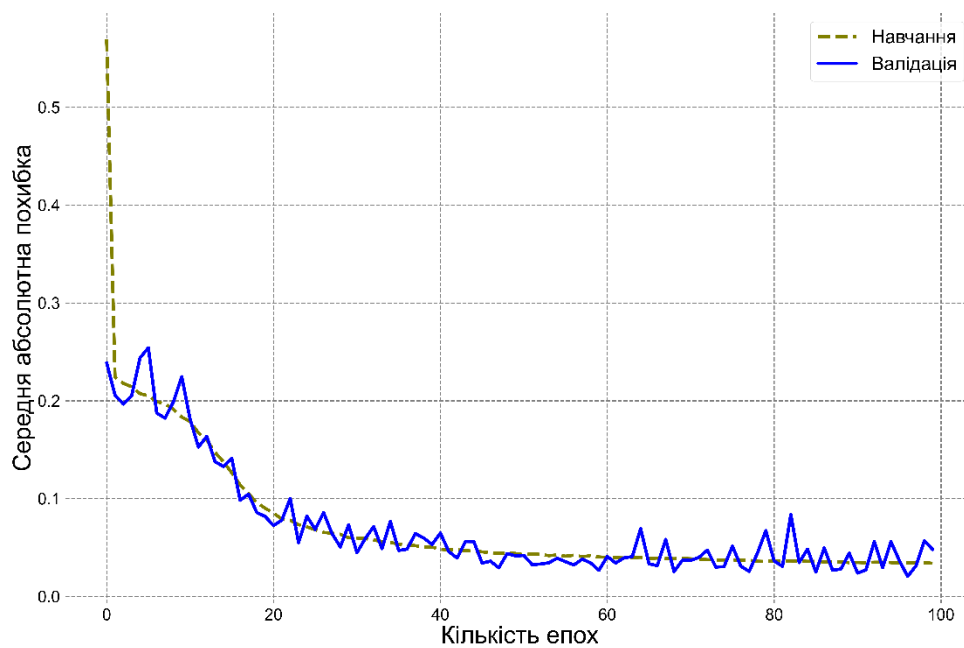
Джерело: розроблено автором

Найбільше значень припадає на помилки від 0 до 0,1, таких понад 700 випадків, що свідчить про високу точність моделі в більшості випадків. Є окремі поодинокі помилки (до 0,25). Це може свідчити про викиди (outliers) або ситуації, де модель не змогла правильно узагальнити.

На рис. 3.19а та 3.19б наведено результати порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) для навчального та валідаційного наборів даних моделі ШНМ3.



(a)



(б)

Рис. 3.19. Результати порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) для навчального та валідаційного наборів даних моделі ШНМЗ. Джерело: розроблено автором

Рис. 3.19а демонструє розподіл середньоквадратичної похибки.
Максимальні значення становили:

- навчальна вибірка – 5,0709;
- валідаційний набір – 0,7770.

Мінімальні значення були такими:

- навчальна вибірка – 0,0023;
- валідаційний набір – 0,0019.

Рис. 3.19б ілюструє порівняння середньої абсолютної похибки.

Максимальні значення:

- навчальна вибірка – 1,5326;
- валідаційний набір – 0,6507.

Мінімальні значення:

- навчальна вибірка – 0,0308;
- валідаційний набір – 0,0278.

На рис. 3.20 представлено розподіл прогнозованих і цільових значень для моделі ШНМЗ.

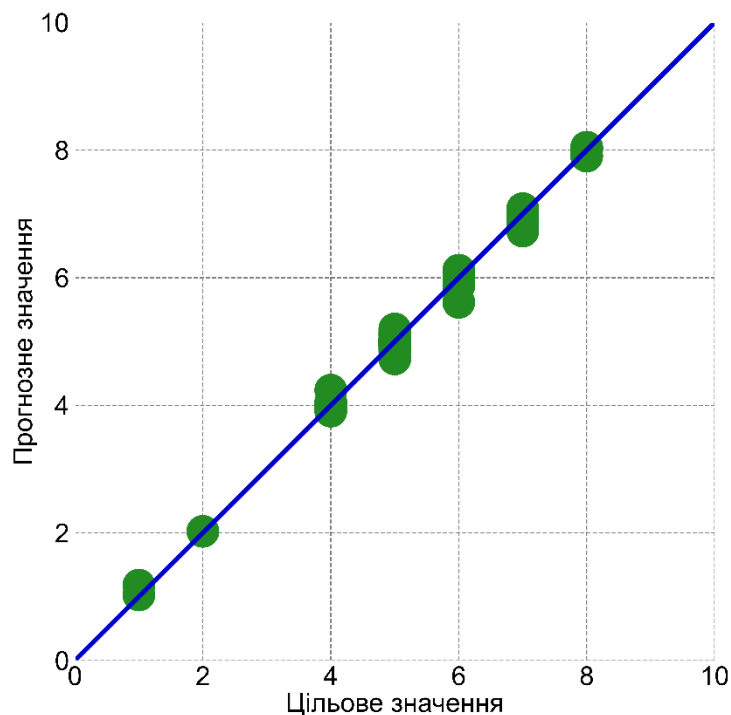


Рис. 3.20. Розподіл прогнозованих і цільових значень для моделі ШНМЗ

Джерело: розроблено автором

З рисунку видно, що при будь-яких цільових значеннях оцінки стану модель прогнозує значення досить точно, оскільки переважна більшість прогнозованих значень практично збігаються з лінією регресії.

На гістограмі (рис. 3.21) зображено розподіл помилок для моделі ШНМ3.

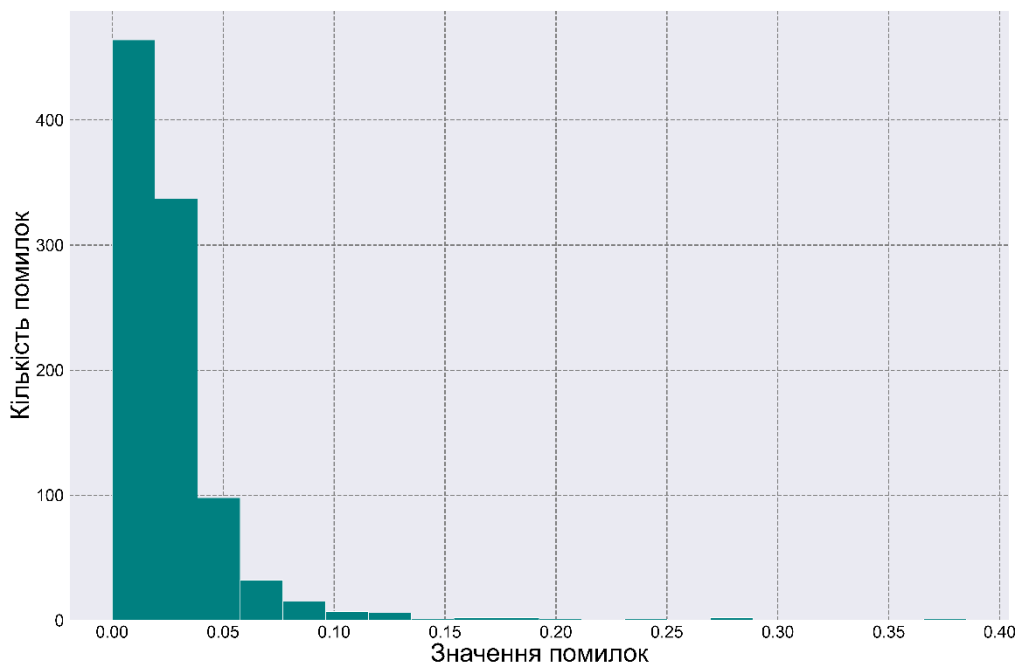
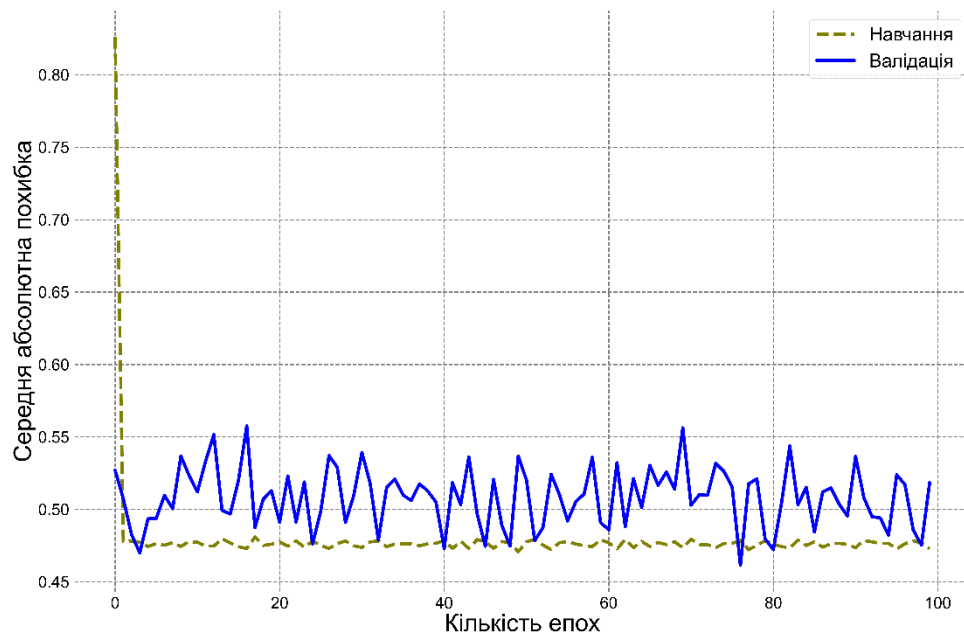


Рис. 3.21. Гістограма розподілу помилок для моделі ШНМ3

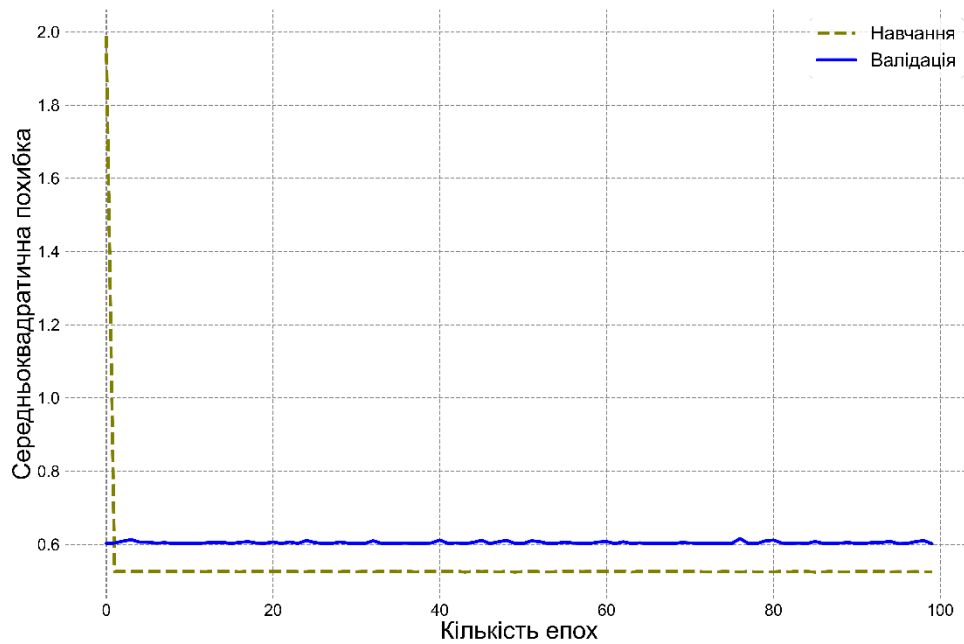
Джерело: розроблено автором

Найбільше значень помилки припадає на діапазон від 0,0 до 0,025, більше 400 та більше 300 випадків, відповідно, що свідчить про високу точність моделі в більшості випадків. Є окремі поодинокі помилки в діапазоні від 0,025 до 0,1. Це може свідчити про викиди (outliers) або ситуації, де модель не змогла правильно узагальнити. Розподіл дещо скошений вправо (right-skewed), що характерно для добре навчених моделей – більшість прогнозів близькі до істини, але трапляються поодинокі промахи.

На рис. 3.22а та 3.22б наведено результати порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) для навчального та валідаційного наборів даних моделі ШНМ4.



(а)



(б)

Рис. 3.22. Результати порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) для навчального та валідаційного наборів даних моделі ШНМ4. Джерело: розроблено автором

Рис. 3.22а демонструє розподіл середньоквадратичної похибки.

Максимальні значення становили:

- навчальна вибірка – 1,9895;
- валідаційний набір – 0,6025.

Мінімальні значення були такими:

- навчальна вибірка – 0,0023;
- валідаційний набір – 0,0019.

Рис. 3.22б ілюструє порівняння середньої абсолютної похибки.

Максимальні значення:

- навчальна вибірка – 0,5250;
- валідаційний набір – 0,6021.

Мінімальні значення:

- навчальна вибірка – 0,4729;
- валідаційний набір – 0,5185.

На рис. 3.23 представлено розподіл прогнозованих і цільових значень для моделі ШНМ4.

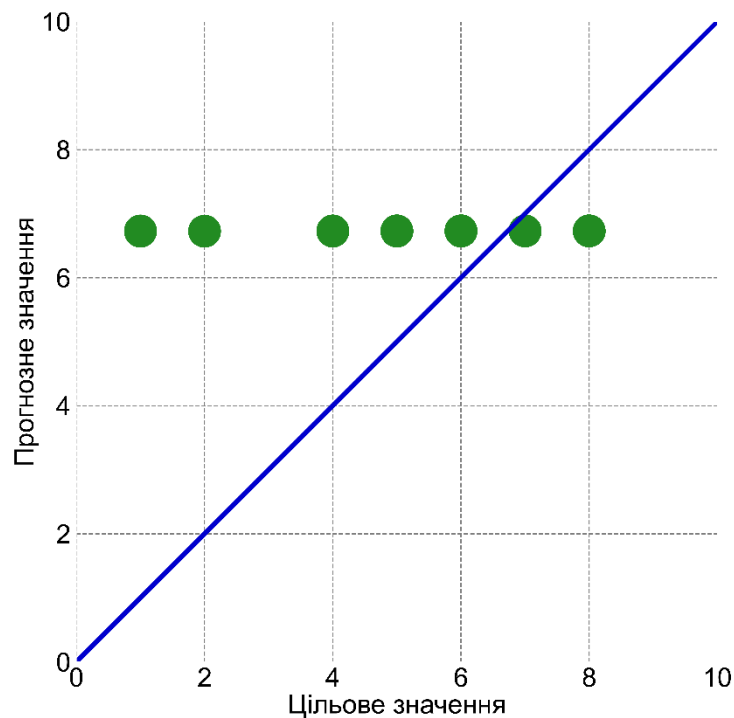


Рис. 3.23. Розподіл прогнозованих і цільових значень для моделі ШНМ4

Джерело: розроблено автором

З рисунку видно, що при будь-яких цільових значеннях оцінки стану модель прогнозує значення досить погано. Цільові значення в діапазоні 0-6 знаходять вище лінії регресії, а в діапазоні 7-9 – нижче. Найбільш наближені до лінії регресії цільові значення 6-8.

На гістограмі (рис. 3.24) зображено розподіл помилок для моделі ШНМ4.

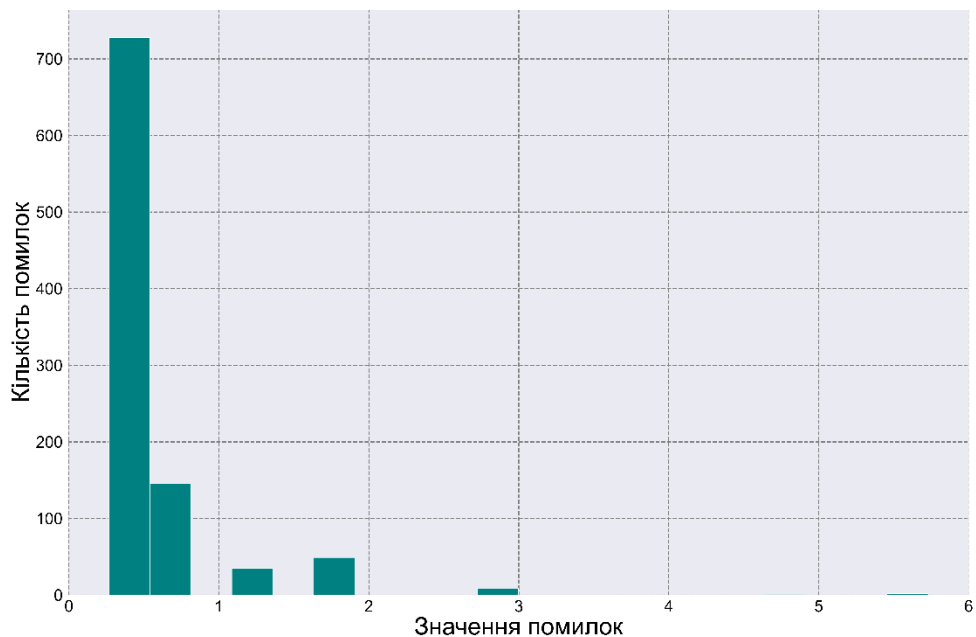
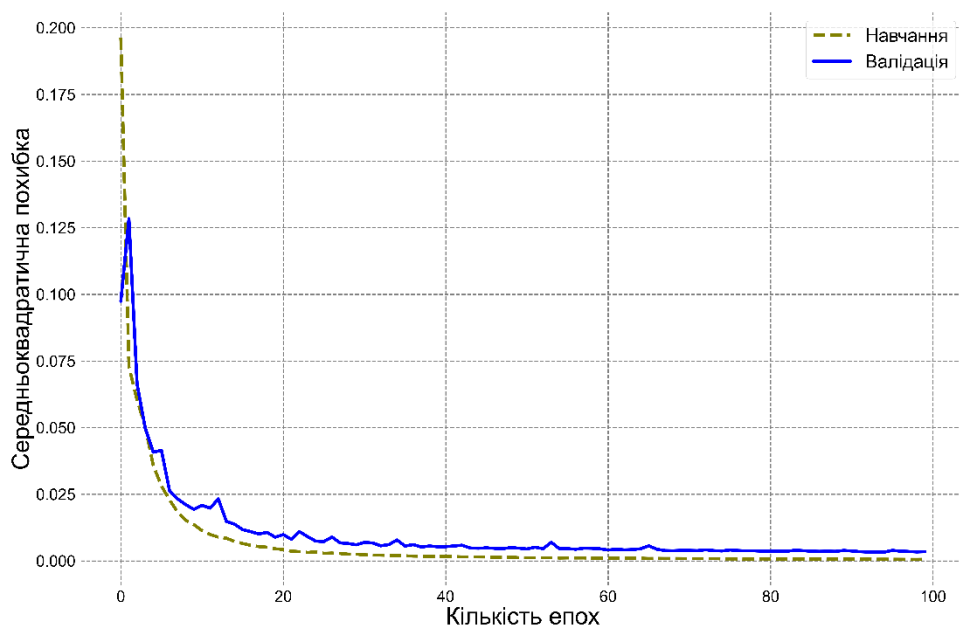


Рис. 3.24. Гістограма розподілу помилок для моделі ШНМ4

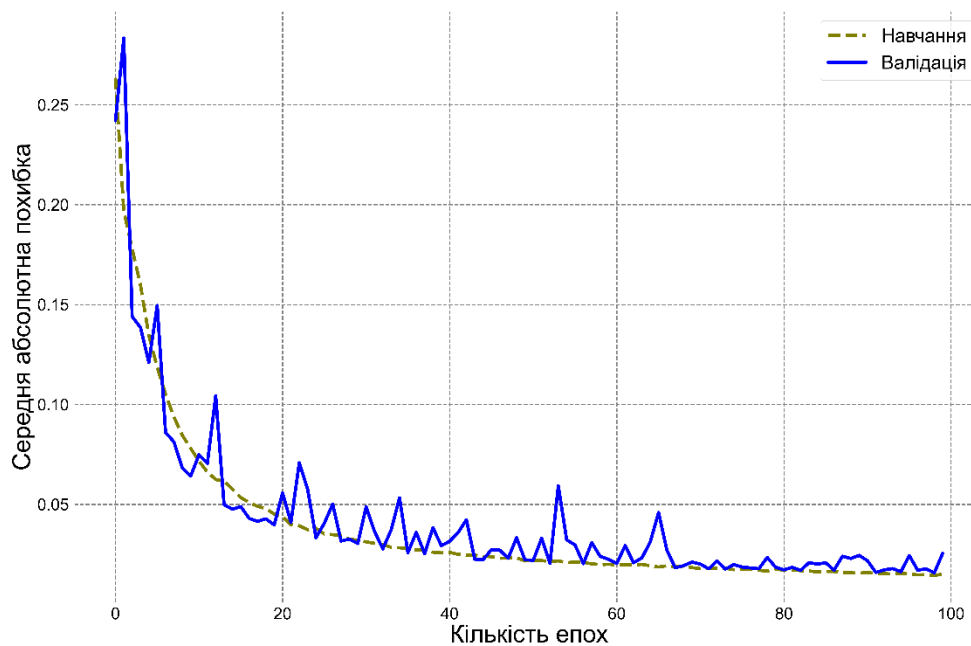
Джерело: розроблено автором

Найбільше значень помилки припадає на діапазон від 0,0 до 0,75 – понад 700 таких випадків. Є окремі поодинокі помилки в діапазоні від 1 до 3. Це може свідчити про викиди (outliers) або ситуації, де модель не змогла правильно узагальнити.

На рис. 3.25а та 3.25б наведено результати порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) для навчального та валідаційного наборів даних моделі ШНМ5.



(а)



(б)

Рис. 3.25. Результати порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) для навчального та валідаційного наборів даних моделі ШНМ5. Джерело: розроблено автором

Рис. 3.25а демонструє розподіл середньоквадратичної похибки.
Максимальні значення становили:

- навчальна вибірка – 0,1962;
- валідаційний набір – 0,0974.

Мінімальні значення були такими:

- навчальна вибірка – $5,978 \times 10^{-4}$;
- валідаційний набір – 0,0035.

Рисунок 3.25б ілюструє порівняння середньої абсолютної похибки.

Максимальні значення:

- навчальна вибірка – 0,2636;
- валідаційний набір – 0,2420.

Мінімальні значення:

- навчальна вибірка – 0,0151;
- валідаційний набір – 0,0255.

На рис. 3.26 представлено розподіл прогнозованих і цільових значень для моделі ШНМ5.

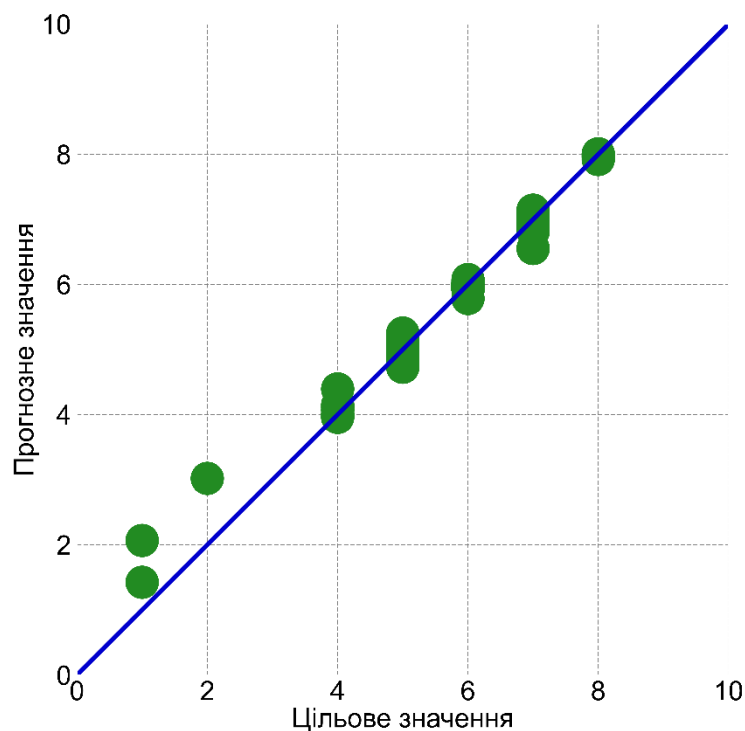


Рис. 3.26. Розподіл прогнозованих і цільових значень для моделі ШНМ5

Джерело: розроблено автором

З рисунку видно, що при малих цільових значеннях оцінки стану (1–2) модель прогнозує надто великі значення (всі точки ліворуч лежать вище синьої лінії). В середньому діапазоні (4–7) модель демонструє кращу поведінку - прогнози ближчі до істинних значень, хоча все ще спостерігається розкид. При більших цільових значеннях (8–9) прогнози є найточнішими, оскільки переважна більшість прогнозованих значень практично збігаються з лінією регресії.

На гістограмі (рис. 3.27) зображено розподіл помилок для моделі ШНМ5.

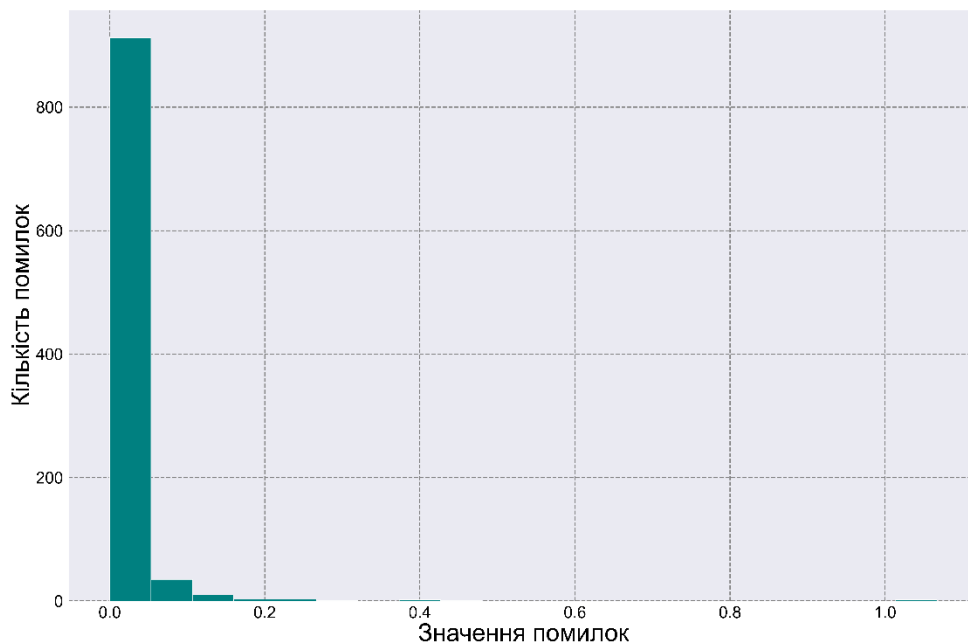
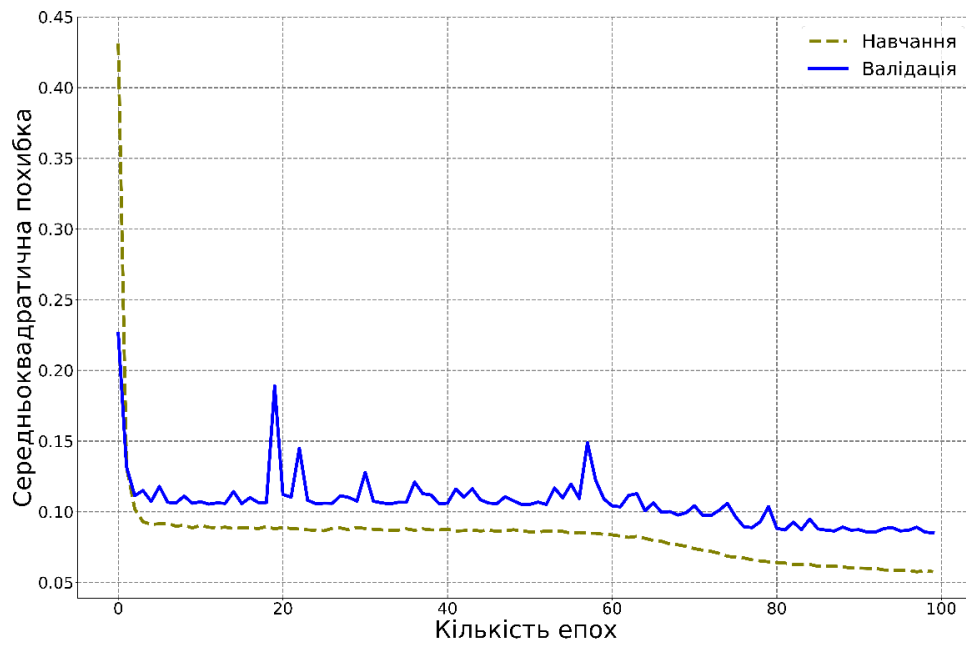


Рис. 3.27. Гістограма розподілу помилок для моделі ШНМ5

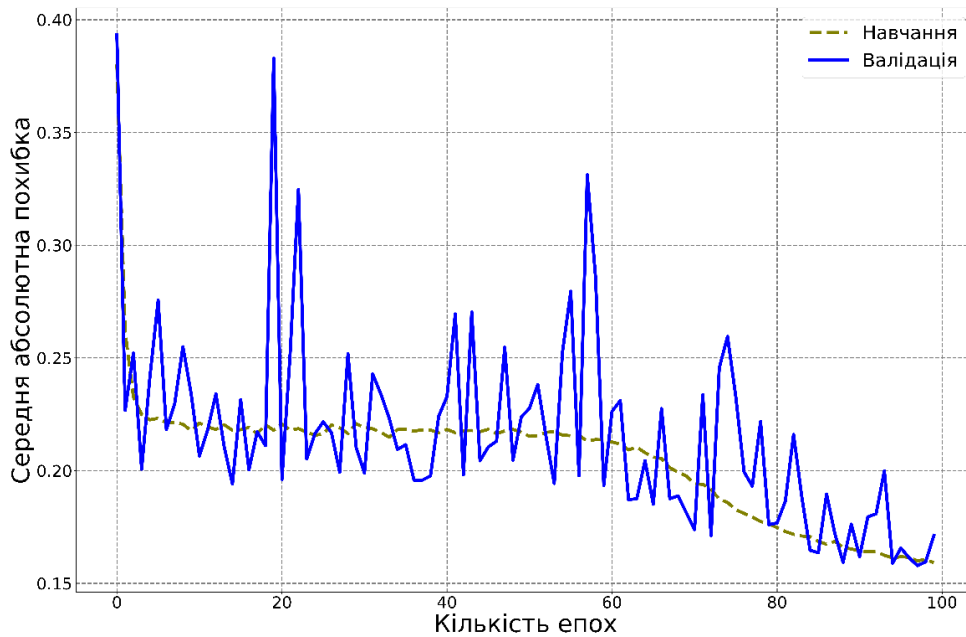
Джерело: розроблено автором

Найбільше значень припадає на помилки від 0 до 0,1, таких понад 800 випадків, що свідчить про високу точність моделі в більшості випадків. Є окремі поодинокі помилки (до 0,25). Це може свідчити про викиди (outliers) або ситуації, де модель не змогла правильно узагальнити.

На рис. 3.28а та 3.28б наведено результати порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) для навчального та валідаційного наборів даних моделі ШНМ6.



(а)



(б)

Рис. 3.28. Результати порівняння середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE) для навчального та валідаційного наборів даних моделі ШНМ6. Джерело: розроблено автором

Рис. 3.28а демонструє розподіл середньоквадратичної похибки.
Максимальні значення становили:

- навчальна вибірка – 0,4315;
- валідаційний набір – 0,2261.

Мінімальні значення були такими:

- навчальна вибірка – 0,0576;
- валідаційний набір – 0,0850.

Рис. 3.28б ілюструє порівняння середньої абсолютної похибки.

Максимальні значення:

- навчальна вибірка – 0,3802;
- валідаційний набір – 0,3935.

Мінімальні значення:

- навчальна вибірка – 0,1591;
- валідаційний набір – 0,1712.

На рис. 3.29 представлено розподіл прогнозованих і цільових значень для моделі ШНМ6.

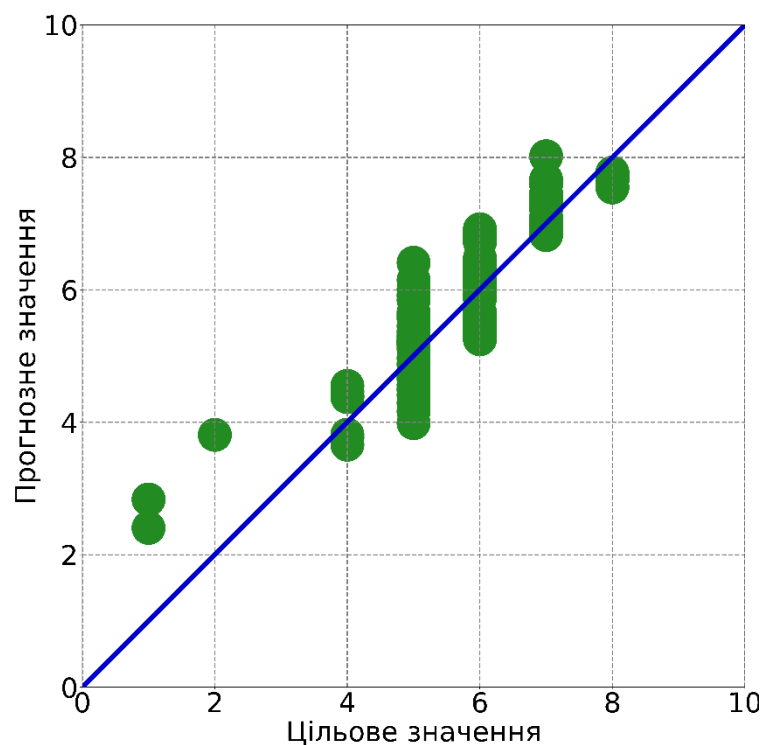


Рис. 3.29. Розподіл прогнозованих і цільових значень для моделі ШНМ6

Джерело: розроблено автором

З рисунку видно, що при малих цільових значеннях оцінки стану (1–4) модель прогнозує надто великі значення (всі точки ліворуч лежать вище синьої лінії). В середньому діапазоні (4–7) модель демонструє кращу поведінку - прогнози ближчі до істинних значень, хоча все ще спостерігається розкид. При більших цільових значеннях (8–9) прогнози є найточнішими, оскільки переважна більшість прогнозованих значень практично збігаються з лінією регресії.

На гістограмі (рис. 3.30) зображено розподіл помилок для моделі ШНМ6.

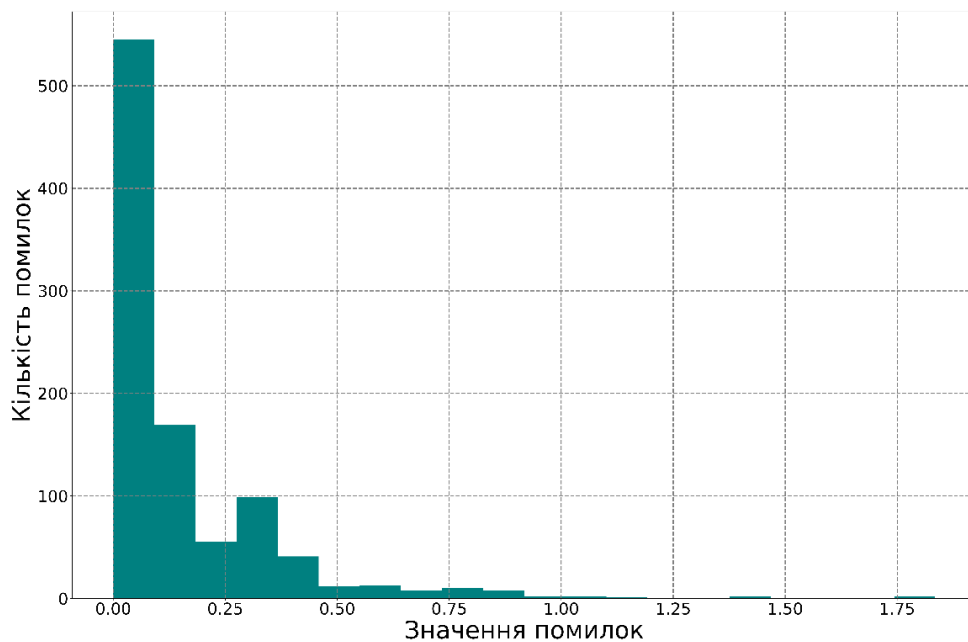


Рис. 3.30. Гістограма розподілу помилок для моделі ШНМ6

Джерело: розроблено автором

Найбільше значень припадає на помилки від 0 до 0,15, таких понад 500 випадків, що свідчить про високу точність моделі в більшості випадків. Крім того, є окремі поодинокі помилки до 1,5. Це може свідчити про викиди (outliers) або ситуації, де модель не змогла правильно узагальнити.

Таблиця 3.5

Порівняння ефективності моделей ШНМ. Джерело: розроблено автором.

	ШНМ1	ШНМ2	ШНМ3	ШНМ4	ШНМ5	ШНМ6
функція активації	sigmoid	sigmoid	ReLU	ReLU	softmax	softmax
Оптимізатор	SGD	Adam	Adam	SGD	Adam	SGD
R^2	0,9754	0,9969	0,9929	0,8908	0,9921	0,8712
MAPE, %	0,8	0,4	0,2	7,12	0,4	2,4

У таблиці 3.5 подано результати аналізу ефективності моделей ШНМ шляхом порівняння показників MAPE і R^2 . Всі моделі продемонстрували відносно високу продуктивність – високі значення R^2 та низькі MAPE. З аналізу видно, що використання оптимізатора ADAM забезпечило вищу ефективність у порівнянні з SGD. Зокрема, модель ШНМ3 продемонструвала найкращі результати – найнижчий рівень похибки MAPE і найвищий коефіцієнт детермінації R^2 . У цій моделі для прихованих шарів було використано активаційну функцію ReLU, а як оптимізатор – ADAM. Найкращі результати були зафіксовані на 100-й епосі: MAPE = 0,2%, R^2 = 0,9929.

На підставі досліджень третього розділу було одержано провідний результат роботи: цифрова, організаційно-технологічна модель опису проекту відновлення мостових споруд. Модель являє собою організаційно-технологічну модель у вигляді цифрового багатогранника (рис. 3.31).



Рис. 3.31. Організаційно-технологічна модель формалізованого опису проєкту відновлення мостових споруд, що подана у вигляді цифрового багатогранника. Джерело розроблено автором

Кожна із граней являє собою цифрову, мережеву модель типу «робота-матриця», параметри якої є характеристиками виконання робіт та девелоперського середовища організацій-виконавців за окремою стадією девелоперського проєкту відновлення (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Стадії девелоперського проєкту відновлення мостових споруд

№	Назва стадії	Зміст стадії
1.	Формування девелоперського середовища проєкту та оргструктури адміністрування	Визначення цілей і завдань; формування системи управління проєктом; розподіл ролей і відповідальності; створення цифрового, інформаційно-аналітичного середовища для комунікацій і супроводу
2.	Підготовча стадія	Збір та систематизація вихідних даних; аналіз нормативної та дозвільної документації; вивчення умов ділянки розташування споруди; формування вихідних технічних завдань.

№	Назва стадії	Зміст стадії
3.	Оцінка технічного стану споруди	Проведення обстежень з використанням ПС. Класифікація елементів за експлуатаційними станами; формалізація результатів у цифрових та інтелектуальних інформаційних системах
4.	Варіативне цифрове та організаційно - технологічне моделювання ДПВ	Формування сценаріїв циклу, розробка ВІМ-моделі, планування термінів та ресурсних потреб; складання плану виконання робіт
5.	Регламентация	Узгодження нормативно-правових аспектів; затвердження регламентів взаємодії між організаціями-учасниками; встановлення системи контролю та звітності
6.	Підбір організацій-виконавців	Проведення конкурсних відборів або тендерів; формування пулу підрядних і субпідрядних організацій; укладення контрактів
7.	Складання бюджету та кошторисів	Деталізація фінансового плану; складання локальних і зведених кошторисів; узгодження фінансових джерел; формування механізмів контролю витрат
8.	Виконання будівельних та спеціальних робіт	Організація та реалізація будівельно-монтажних, відновлювальних і спеціальних робіт; застосування сучасних технологій та цифрових систем оцінювання; контроль дотримання ПВР, якості та безпеки
9.	Прийняття робіт та підсумковий контроль	Підсумкова технічна експертиза; аудит кошторисів і фактичних витрат; затвердження результатів; введення об'єкта в експлуатацію

Джерело: розроблено автором.

Параметри моделі подано на рис. 3.7. Модель було покладено в основу аналітичного інструментарію супроводу проєкту відновлення, в якому оцінка технічного стану (третя стадія) розрахована із застосуванням: інструментів технічних обстежень, сенсорних систем, інструментів, нечіткої логіки та алгоритмів сценарно-імітаційного коригування. В якості програмного середовища використано Matlab R2014.

1	Номер стадії	від 1 до 9	9
2	Зміст стадії		Регламентация
3	Організація-виконавець (ОВ)	Укртрансміст	
4	Тип конструкції мосту ,з відображенням ширини прогонів,к-цій балок та кріплень,типів з'єднань тощо	посилання на аркуш	LBR-18-401
5	Масова частка арматури (сталі)	Тонн на 1 пог м.	483,1
6	BIM-модель виконання робіт	посилання на цифрову адресу	BMI-4- L9Q141
7	План-графік виконання робіт	посилання на цифрову адресу	GRJ-5-56
8	Рівень сертифікованості якості виконання робіт	посилання на стандарти ISO	ISO 9001.
9	Кошторисна вартість планова	тис.грн.	841,22
10	Індекс коригування кошторисної вартості виконання робіт,з врахуванням експертних та сценарно-імітаційних алгоритмів	індекс	1,034
11	Кошторисна вартість розрахункова (скоригвана)	тис.грн.	869,82
12	Планова тривалість виконання роботи	роб.дні	41
13	Індекс коригування тривалості виконання робіт,з врахуванням експертних та сценарно-імітаційних алгоритмів	індекс	1,092
14	Розрахункова тривалість виконання роботи	роб.дні	44
15	Склад робітників	посилання на цифрову адресу	LA-12-Q113
16	Компетенція та фаховий склад	посилання на цифрову адресу	LF-12-F37
17	Ресурсна відомість -матеріали,вироби, комплектуючі	посилання на цифрову адресу	LR-14-Q5-115
18	Відомість потреби в машинах,механізмах	посилання на цифрову адресу	LMW-1Q5 - 139
19	Відомість потреби у вимірювальний приладах та сенсорних системах	посилання на цифрову адресу	LIS-5- 16-174
20	Кошторис на виконання робіт	посилання на цифрову адресу	L9-5-17- 233
21	Частка в загальному бюджеті девелоперського проєкту	%	3,76
22	Оцінка виконавчої готовності ОВ	Бали (макс. 100)	91,2
23	Оцінка управлінських компетенцій ОВ	Бали (макс. 100)	94,5
24	Оцінка цифрової культури та цифрової зрілості управлінського персоналу ОВ	Бали (макс. 100)	89,6
25	Імілжева оцінка ОВ з боку девелопера	Бали (макс. 100)	95

Рис. 3.7. Матриця параметрів по окремій стадії проєкту – компоненти «багатогранника» мережевої моделі. Джерело: розроблено автором

Висновки до розділу 3.

1. У межах дослідження запропоновано впровадження сучасних технологій візуалізації та сенсорного аналізу для реалізації інтелектуального моніторингу

мостових споруд. Інтеграція високоточних сенсорів, зокрема акселерометрів, тензометрів та геодезичних приладів, з цифровими платформами обробки даних, забезпечує безперервний збір та оперативну інтерпретацію інформації про технічний стан конструкцій. Завдяки цьому вдається підвищити точність діагностики, зменшити залежність від суб'єктивних візуальних обстежень і створити передумови для автоматизованого раннього виявлення пошкоджень, що безпосередньо впливає на підвищення безпеки експлуатації мостів.

2. Запропоновано комплексний підхід, який охоплює збір, передавання, зберігання та обробку даних у реальному часі, що дозволило своєчасно ідентифікувати потенційно критичні зміни в параметрах конструкцій. Запроваджені алгоритми аналізу даних з сенсорів і візуальних джерел дозволили забезпечити високий ступінь кореляції між фактичними змінами в конструкціях та прогнозними моделями поведінки об'єкта. Таким чином, вдається досягнути підвищення надійності систем моніторингу, що забезпечує формування сучасних стратегій управління їх життєвим циклом.

3. Інтеграція штучного інтелекту з цифровими інформаційними моделями мостів, зокрема з BIM-середовищами, відкриває нові можливості для системного підходу до управління технічним станом інженерних споруд. Поєднання структурованих даних про геометрію, матеріали, експлуатаційні характеристики та результати сенсорного моніторингу дозволяє створити цифрових «двійників» мостів, які є ефективним інструментом для прогнозування деградації конструкцій. Алгоритми ШІ можуть виявляти закономірності в зміні стану об'єкта, прогнозувати ймовірність виникнення критичних дефектів та рекомендувати оптимальні сценарії технічного обслуговування. Такий підхід підтримує ухвалення обґрунтованих рішень щодо пріоритизації ремонтних робіт, оптимізації витрат і підвищення експлуатаційної безпеки мостових споруд. Запропонований підхід закладає підґрунтя для створення автоматизованих систем підтримки прийняття рішень у сфері експлуатації мостів.

4. Доведено, що початкові етапи (збір даних, попередня обробка даних тощо) належать до найважливіших кроків у побудові моделі. Саме від якості, змістовності та збалансованості вхідних змінних залежить здатність нейронної мережі адекватно навчатися та робити точні прогнози. Сформовано базу даних вхідних змінних, до яких було включено: рік побудови, середньодобовий трафік, вік мосту, оцінка стану проїзної частин, оцінка стану надбудови, оцінка стану підбудови, оцінка стану русла та захисту русла, оцінка загального структурного стану, оцінка геометрії проїзної частини, прогнозований середньодобовий трафік, обчислений середньодобовий вантажний трафік (обсяг), середня відносна вологість, середня температура, кількість днів із температурою нижче 0° , тривалість вологого стану, загальна кількість опадів.

5. Розроблено шість варіантів моделей ШНМ з однаковою архітектурою, але з різними функціями активації та алгоритмами оптимізації. Для активації застосовувалися функції sigmoid, softmax, ReLU та tanh, а для оптимізації – алгоритми SGD і ADAM. Аналіз ефективності моделей ШНМ шляхом порівняння показників MAPE і R^2 показав, що модель ШНМ3 продемонструвала найкращі результати – найнижчий рівень похибки MAPE і найвищий коефіцієнт детермінації R^2 . У цій моделі для прихованих шарів було використано активаційну функцію ReLU, а як оптимізатор – ADAM. Найкращі результати були зафіксовані на 100-й епосі: $\text{MAPE} = 0,2\%$, $R^2 = 0,9929$.

6. Найвагоміші результати третього розділу дисертаційної роботи – цифрова, мережева, організаційно-технологічна модель та науково-аналітичний інструментарій. Розроблено мережеву організаційно-технологічну модель формалізованого опису девелоперського проєкту відновлення мостових споруд, представлену у вигляді «цифрового багатогранника». Кожна грань цього багатогранника відповідає цифровій мережевій моделі типу «робота–матриця», що відображає параметри виконання робіт, особливості технологічних процесів і специфіку девелоперського середовища організацій-учасників. Такий підхід забезпечує комплексне охоплення усіх етапів реалізації проєкту – від створення

організаційно-адміністративного середовища, підготовчих робіт та оцінки технічного стану споруди до моделювання, вибору виконавців, формування кошторисів, виконання будівельно-монтажних робіт і підсумкового техніко-економічного контролю. Запропонована модель формує системну основу управління відновленням мостових споруд у цифровому середовищі.

7. Система параметрів мережевої моделі забезпечує багатовимірний опис девелоперського проєкту відновлення, охоплюючи технічні, ресурсні, організаційні, управлінські та екологічні характеристики. Вона включає дані про конструктивні особливості мосту, масову частку сталі, BIM-моделі, графіки, кошториси, кадровий склад і компетенції виконавців. Водночас параметрична система враховує управлінську зрілість, цифрову культуру, ризики зриву постачання, рівень інноваційності, стійкість до загроз, індекс ритмічності виконання робіт, показники енергоємності, вуглецевого сліду та автоматизації. Такий комплекс створює параметричне цифрове ядро девелоперського проєкту відновлення (ДПВ), що підвищує гнучкість, системність і надійність управління у цифровій екосистемі будівельного девелопменту.

8. Сформовано триступеневий цифровий інструментарій для аналітичного оцінювання технічного стану інженерних споруд, який інтегрує мережеву модель нового типу, цифрові технології, BIM-моделювання та інтелектуальні алгоритми. Перший рівень передбачає автоматизоване збирання та попередню обробку даних із сенсорів і безпілотників із використанням комп'ютерного зору та глибокого навчання. Другий рівень охоплює моделювання параметрів стану конструкцій у BIM та SCADA-середовищах із застосуванням штучного інтелекту. Третій рівень передбачає інтеграцію інтелектуальних моделей у систему управління проєктом відновлення, що забезпечує високу точність прогнозування, оптимізацію технічного обслуговування та зниження експлуатаційних ризиків.

РОЗДІЛ 4

ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ БУДІВЕЛЬ ТА ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

4.1. Розроблення алгоритму оцінювання стану інженерних споруд на основі інтегрованої BIM-моделі

Використання BIM як бази знань для формування вхідних і вихідної змінної в моделюванні ШНМ для оцінки технічного стану мостів – це сучасний і перспективний підхід. BIM-моделі містять велику кількість структурованої інформації (геометрію, фізичні властивості, експлуатаційні характеристики, а також часові й логістичні аспекти об'єкта), яка може слугувати джерелом як даних для навчання, так і цільових показників.

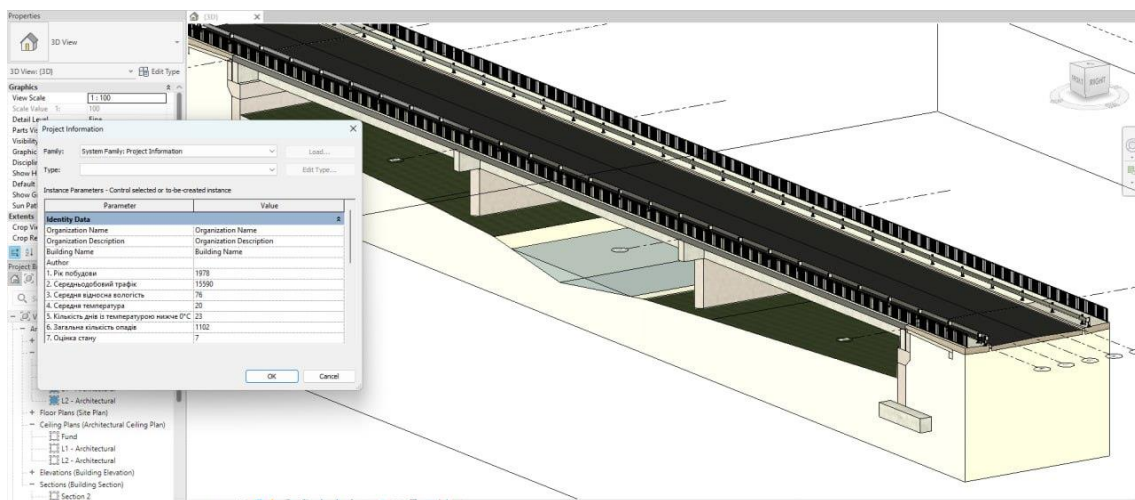


Рис. 4.1. 3D-модель мостової споруди, створену в програмному середовищі Autodesk Revit. Джерело: розроблено автором

На рис. 4.1 зображено 3D-модель мостової споруди, створену в програмному середовищі Autodesk Revit. Тип об'єкта – автомобільний міст з проїжджою частиною, огороженням та опорами. Міст має прольоти, які

спираються на опори (в т.ч. проміжні опори та берегові устої). Проїжджа частина асфальтована, з двома бортовими бар'єрами – металевими перилами.

Вікно параметрів «Project Information» містить приклад частини даних, що використовуються для прогнозування показника Оцінка стану.

1. Рік побудови – 1978. Цей параметр вказує на вік споруди, що дозволяє визначити ймовірний ступінь зносу та потребу в обстеженнях або реконструкції. Враховуючи понад 45 років експлуатації, міст потенційно може мати серйозні вікові дефекти конструкційних елементів.

2. Середньодобовий трафік – 15 590 одиниць транспорту на добу. Це значення відображає інтенсивність транспортного навантаження. Високий добовий трафік свідчить про важливу роль моста в транспортній інфраструктурі регіону та вказує на необхідність регулярного моніторингу технічного стану.

3. Середня вологість – 75%. Високий рівень вологості може сприяти корозії металевих елементів, прискореному руйнуванню бетону та погіршенню ефективності гідроізоляційних систем. Такі умови вимагають підвищеної уваги до захисних покриттів.

4. Середня температура – 7°C. Порівняно низька середньорічна температура свідчить про потенційний ризик термічних деформацій, а також регулярне замерзання-танення води, що може спричиняти утворення мікротріщин у бетоні.

5. Кількість днів з температурою нижче 0°C – 93 дні на рік. Значна кількість морозних днів посилює дію циклів заморожування-відтавання. Це критично для покриття проїжджої частини та бетонних елементів, які піддаються впливу атмосферних опадів і води.

6. Загальна кількість опадів – 1102 мм на рік. Інтенсивні опади можуть збільшувати навантаження на дренажну систему та конструкцію мосту загалом. Надмірна волога – фактор ризику для довговічності матеріалів.

7. Оцінка стану – 7 з 9. Значення "7" свідчить про задовільний стан з можливими локальними пошкодженнями, що потребують технічного обстеження або планового ремонту, але не несуть загрози цілісності споруди.

Із BIM-моделі можна автоматизовано або напівавтоматизовано експортувати низку змінних, що є цінними для машинного навчання. До основних інформаційних категорій належать:

1. Конструктивні параметри:
 - тип конструкції (арочна, балкова, підвісна тощо);
 - довжина, ширина, висота прольотів;
 - перетини балок, колон, ферм;
 - типи матеріалів (бетон, сталь, композити) та їхні властивості;
 - дані про сполучення елементів (зварювання, болти, з'єднання).
2. Технологічна й експлуатаційна інформація:
 - рік побудови, ремонту чи модернізації;
 - навантаження, на які проєктувався міст (корисне, граничне, динамічне);
 - дані про транспортний потік, передбачені у фазі проєктування;
 - температурні, вологісні, сейсмічні режими в регіоні.
3. Дані з обстежень і обслуговування:
 - локальні пошкодження (тріщини, корозія, деформації);
 - інформація про технічні перевірки (частота, результати, виявлені дефекти);
 - відомості про ремонтні роботи, матеріали та технології, які використовувалися.

Зазвичай BIM-моделі не містять «оцінки стану» в числовій формі напряду, тому для розрахунку цього показника запропоновано наступну інтеграцію систем та процесів:

А.Експерт або система формує BIM-модель мосту (наприклад у середовищі Revit).

В.Плагін або скрипт на Python вивантажує потрібні параметри в таблицю/CSV/базу.

С. Дані очищуються, стандартизуються.

Д. Формується матриця у якій $X_1 - X_n$ (вхідні параметри), а Y (оцінка стану мосту).

Е. Дані подаються на вхід до моделей штучного інтелекту.

Процес створення та застосування моделей штучного інтелекту представлено на рис. 4.2.

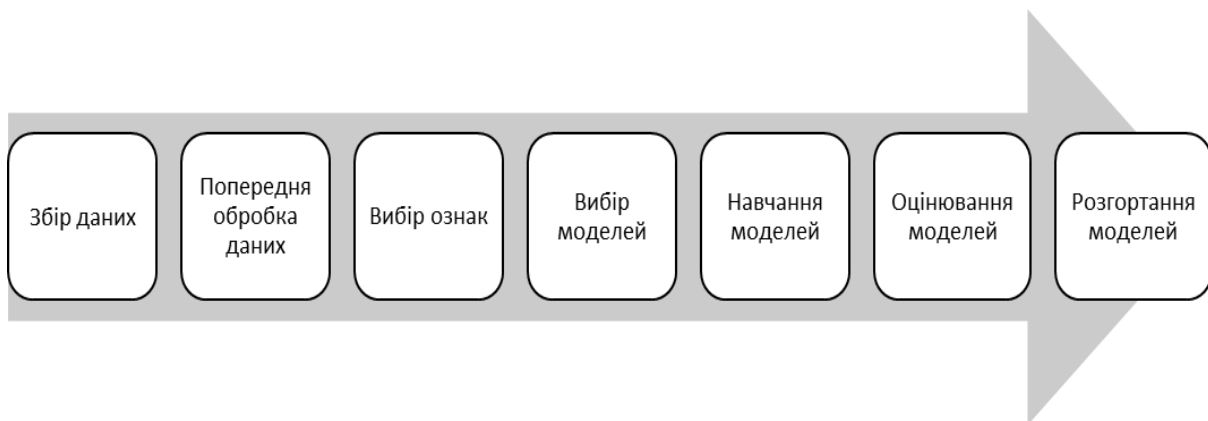


Рис. 4.2. Процес створення та використання моделей штучного інтелекту

Першим кроком є збір даних, що містять різноманітні показники, які чинять вплив на оцінку стану мосту (табл.4.1).

Попередня обробка даних. Зібрані дані попередньо обробляються з метою усунення пропусків, нормалізації значень та приведення їх до єдиного формату.

Вибір ознак. Далі здійснюється відбір найбільш інформативних ознак, які дозволяють встановити зв'язок між вхідними змінними ($x_1 - x_{16}$) та вихідною змінною (y , Оцінка стану).

Вибір моделі. Наступним етапом є визначення оптимальної моделі штучного інтелекту, яка найкраще відповідає специфіці завдання та характеристикам наявних даних.

Навчання моделі. Обрані моделі навчаються на основі підготовленого датасету із застосуванням алгоритмів навчання з учителем. Дані розділяються

на три підмножини у співвідношенні 70/15/15 – навчальний, валідаційний та тестовий набори.

Оцінка моделей. Після завершення навчання моделі проходять етап оцінки на валідаційній та тестовій вибірках для визначення їх здатності до узагальнення. Основними метриками оцінки виступають середньоквадратична помилка (MSE), середня абсолютна похибка (MAE), коефіцієнт детермінації (R^2) та інші показники залежно від специфіки завдання. Особлива увага приділяється виявленню ефектів перенавчання (overfitting), коли модель показує високу точність на навчальних даних, але погано узагальнює на нові приклади. Для цього порівнюються результати на навчальному та тестовому наборах. У разі виявлення значних розбіжностей застосовуються методи регуляризації, спрощення архітектури моделі або корекція вибору ознак. Також оцінюється стабільність моделі при роботі з даними, що містять шум або незначні відхилення. Для цього можуть проводитися додаткові випробування з використанням змінених або злегка модифікованих вхідних даних.

Розгортання моделей. Після проходження всіх етапів перевірки та валідації модель розгортається у продукційному середовищі для подальшого використання у практичних завданнях, таких як оцінка технічного стану нових конструкцій або прогнозування розвитку пошкоджень. Розгортання включає інтеграцію моделі в існуючі програмні платформи або інформаційні системи управління інфраструктурою. Для забезпечення надійності та відтворюваності результатів розробляються механізми автоматичної обробки нових вхідних даних, а також моніторингу якості прогнозів у режимі реального часу. Крім того, реалізується можливість періодичного оновлення моделі за допомогою нових даних, що дозволяє адаптувати систему до змін умов експлуатації та розширювати її функціональність у міру накопичення статистики.

Початкові етапи (збір даних, попередня обробка даних тощо) належать до найважливіших кроків у побудові моделі. Саме від якості, змістовності та збалансованості вхідних змінних залежить здатність нейронної мережі

адекватно навчатися та робити точні прогнози. Цей процес включає кілька послідовних кроків:

1. Визначення релевантних вхідних змінних. На цьому етапі здійснюється відбір параметрів, які найбільш ймовірно мають вплив на технічний стан мостової споруди. Змінні можуть включати:

1.1. Конструктивні характеристики:

- довжина, ширина та висота прольоту;
- тип опор і матеріал прогонової будови;
- рік побудови або реконструкції;
- тип мосту (балковий, арковий, висячий тощо).

1.2. Експлуатаційні умови:

- середньодобова інтенсивність руху;
- маса допустимого навантаження;
- наявність обмежень для руху (вага, швидкість тощо);
- історія ремонтів чи обстежень.

1.3. Фізико-географічні умови:

- регіон розташування (впливає на кліматичні чинники);
- рівень корозійної активності середовища;
- наявність вібраційних або сейсмічних навантажень.

1.4. Оцінки технічного стану окремих елементів:

- знос конструкцій (наприклад, стан опор, деформаційних швів, підходів);
- результати візуального чи інструментального контролю;
- ступінь пошкоджень.

2. Перевірка повноти та точності даних, а саме чи всі вхідні змінні мають ненульові або непропущені значення; чи не містить набір аномальних або шумових значень; чи є розподіл значень змінних репрезентативним (тобто охоплює достатній діапазон значень).

3. Стандартизація та нормалізація даних. Щоб модель навчалася ефективніше, всі вхідні змінні приводяться до спільного масштабу.

Стандартизація здійснюється за формулою:

$$x' = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (4.1)$$

де: μ – середнє значення, σ – стандартне відхилення.

Нормалізація здійснюється за формулою:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4.2)$$

Це дозволяє уникнути того, що змінні з великими числовими значеннями будуть «переважати» інші в навчанні ШНМ.

4. Формування остаточного вхідного простору. Після всіх перетворень формується вхідна матриця ознак (X), яка має розмірність: n - кількість зразків (рядків, тобто об'єктів – мостів); m – кількість вхідних ознак. Ця матриця використовується як вхід для навчання нейронної мережі.

Таблиця 4.1

Опис вхідних та вихідної змінної використаних у моделюванні

Джерело: розроблено автором

Рік побудови	Рік, у якому було завершено будівництво мосту та введено його в експлуатацію. Важливий для оцінки віку конструкції, а отже – її зносу	x_1
Середньодобовий трафік	Середня кількість транспортних засобів, що проїжджають мостом щодня. Дає уявлення про навантаження на міст у поточний період	x_2
Вік мосту (роки)	Кількість років, що минула з моменту введення мосту в експлуатацію. Визначається шляхом віднімання року побудови від поточного року. Допомогає оцінити довговічність конструкції	x_3
Оцінка стану проїзної частин	Відображає фізичний стан верхньої частини мосту, по якій рухаються транспортні засоби. Оцінка проводиться за шкалою (зазвичай від 0 до 9), де 9 – ідеальний стан, а 0 – аварійний	x_4

Оцінка стану надбудови	Стан несучих елементів над палями чи опорами (балки, арки, ферми). Ці елементи передають навантаження від проїзної частин на підпірні структури	x5
Оцінка стану підбудови	Стан фундаментних елементів: опор, паль, фундаментів. Підбудова сприймає навантаження від усієї конструкції мосту і передає його на ґрунт	x6
Оцінка стану русла та захисту русла	Оцінка стану русла річки під мостом, а також захисних елементів (укріплення берегів, підмостові укоси тощо). Важливо для запобігання розмивів і ерозії	x7
Оцінка загального структурного стану	Комплексна експертна оцінка цілісності всієї конструкції. Враховує стан основних елементів, вантажопідйомність, наявність пошкоджень або деформацій	x8
Оцінка геометрії проїзної частини	Оцінка відповідності геометричних характеристик мосту (ширина, ухили, кути повороту) нормативним вимогам. Має значення для безпеки руху	x9
Прогнозований середньодобовий трафік	Очікувана середньодобова інтенсивність руху через певний період (наприклад, через 10 або 20 років). Враховується при модернізації або реконструкції	x10
Обчислений середньодобовий вантажний трафік (обсяг)	Кількість вантажних транспортних засобів, які проїжджають мостом щодня. Має критичне значення для оцінки навантаження на конструкцію, оскільки вантажівки створюють значно більший тиск, ніж легкові авто	x11
Середня відносна вологість	Показник середнього вмісту вологи в повітрі в регіоні розташування мосту. Висока вологість може пришвидшувати корозійні процеси в сталевих конструкціях	x12
Середня температура	Середнє значення температури повітря за певний період (зазвичай рік). Впливає на температурні деформації матеріалів та довговічність конструкції	x13

Кількість днів із температурою нижче 0°C	Вказує на частоту замерзання в регіоні. Має значення для оцінки ризику пошкодження бетонних елементів через цикл замерзання – відтавання	<i>x14</i>
Тривалість вологого стану	Загальна кількість годин або днів у році, коли конструкція перебуває у вологому стані. Це ключовий чинник корозії для сталевих або залізобетонних елементів	<i>x15</i>
Загальна кількість опадів	Кількість опадів (мм) за рік. Має вплив на навантаження на дренажну систему мосту та потенційне зволоження конструкції	<i>x16</i>
Оцінка стану	Класифікаційний код загального стану мосту відповідно до встановленої системи (наприклад, за категорією придатності до експлуатації). Часто використовується для планування ремонту або виведення з експлуатації	<i>y</i>

4.2. Використання методів нечіткої логіки у структурі алгоритму оцінювання стану конструктивних елементів мостів

На підставі результатів технічного обстеження мостів, що передбачають здійснення візуальної та інструментальної оцінки елементів (табл. 4.2) отримано відповідні числові значення (табл. 4.3).

Таблиця 4.2

Опис процесу оцінки елементів мосту. Джерело: розроблено автором

Компонент	Джерело даних	Як визначають
Substructure	Огляд фундаменту, опор, устоїв	Балами або описово
Superstructure	Огляд прогонових будов	Візуальна оцінка, дефекти
Deck	Покриття, шви, тріщини	Інспекція, георадар
Overall_Structure	Загальний конструктивний стан	Інтегральна оцінка
Channel_Protection	Укріплення русла, береги	Візуально, за документацією

Числові значення оцінки елементів мосту. Джерело: розроблено автором

Компонент	Міст 1	Міст 2	Міст 3	Міст 4	Міст 5	Міст 6
Substructure	3	7	3	5	7	6
Superstructure	3	7	7	5	5	7
Desk	8	2	4	6	6	7
Overall_Structure	3	5	5	3	9	9
Channel_Protection	2	9	6	7	4	2
Bridge_Condition	3,95	4,5	5,63	6,55	7,71	7,42

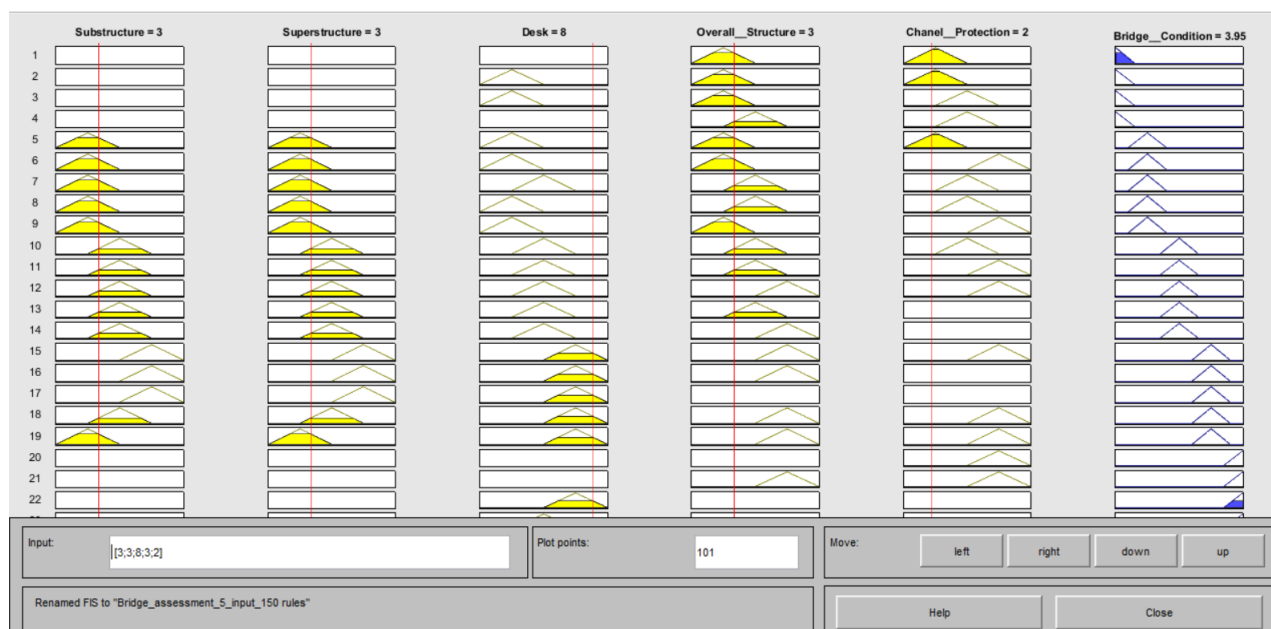


Рис. 4.3. Приклад розрахунку показника Bridge Condition для мосту 1

Джерело: розроблено автором

Substructure та Superstructure мають значення 3, що вказує на їхній посередній або незадовільний стан. Натомість Desk оцінено на 8, тобто проїзна частина мосту перебуває у дуже доброму стані. Загальна оцінка конструкції (Overall Structure) становить 3, що свідчить про наявність загальних проблем у структурі мосту. Channel Protection має дуже низьке значення - 2, тобто захист русла є слабким або незадовільним. Незважаючи на добрий стан проїзної

частини, погані показники інших ключових елементів суттєво вплинули на загальну оцінку. У підсумку, система на основі активованих правил визначила значення Bridge Condition на рівні 3,95, що відповідає стану нижче середнього.

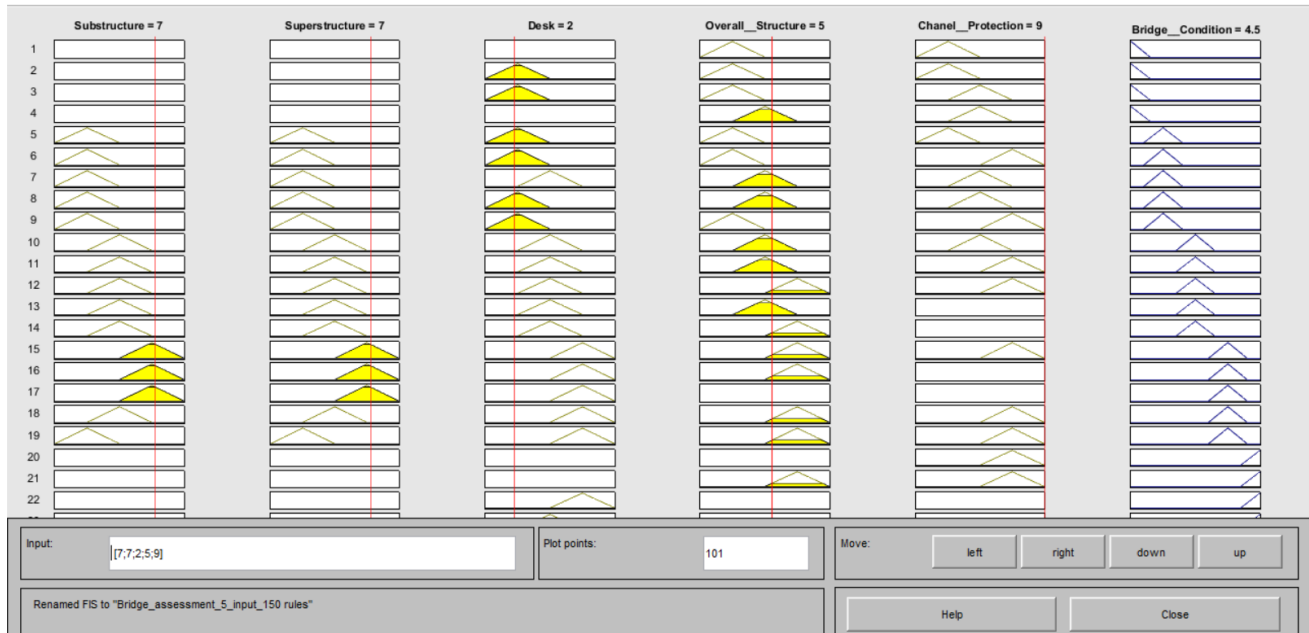


Рис. 4.4. Приклад розрахунку показника Bridge Condition для мосту 2

Джерело: розроблено автором

Substructure та Superstructure мають високі значення (7), отже, вважаються в хорошому стані. Deck має рівень 2, що є дуже низьким значенням, тобто проїзна частина мосту має серйозні проблеми. Overall Structure = 5, що відповідає середньому стану. Channel Protection оціне на 9, тобто - захист русла дуже добрий. Незважаючи на високі значення більшості елементів, низький стан Deck сильно вплинув на загальну оцінку мосту. В результаті, система через активовані правила визначила, що Bridge Condition має значення 4.5, що відповідає "нижче середнього" або "середній стан".

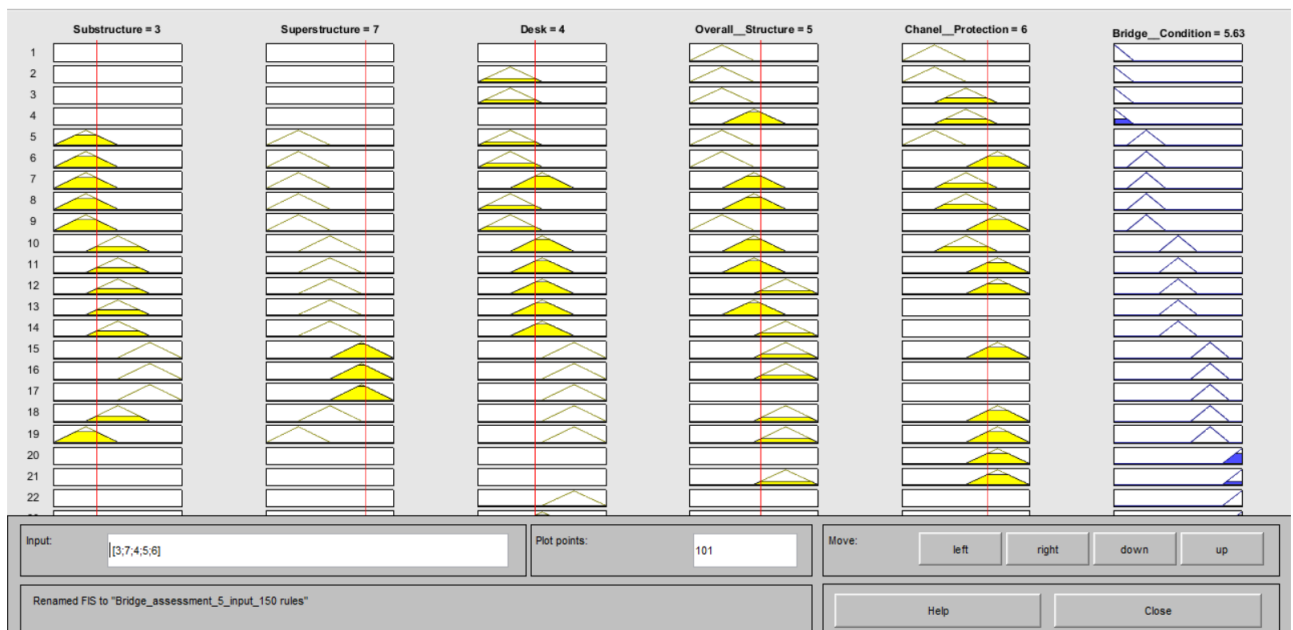


Рис. 4.5. Приклад розрахунку показника Bridge Condition для мосту 3

Джерело: розроблено автором

Substructure має значення 3, що вказує на незадовільний стан підбудови мосту. Superstructure оцінено на 7 – це хороший показник стану надбудови. Значення Desk дорівнює 4, тобто проїзна частина має помітні дефекти або зношення. Overall Structure залишається на рівні 5, що відповідає середньому загальному стану споруди. Chanel Protection отримало оцінку 6 - задовільний рівень захисту русла. Незважаючи на відносно добрий стан надбудови та захисту русла, низькі значення підбудови та Desk знизили загальну оцінку. В результаті система, на основі заданих правил нечіткої логіки, оцінила Bridge Condition на рівні 5.63, що відповідає "середньому" або "дещо вище середнього" стану мосту.

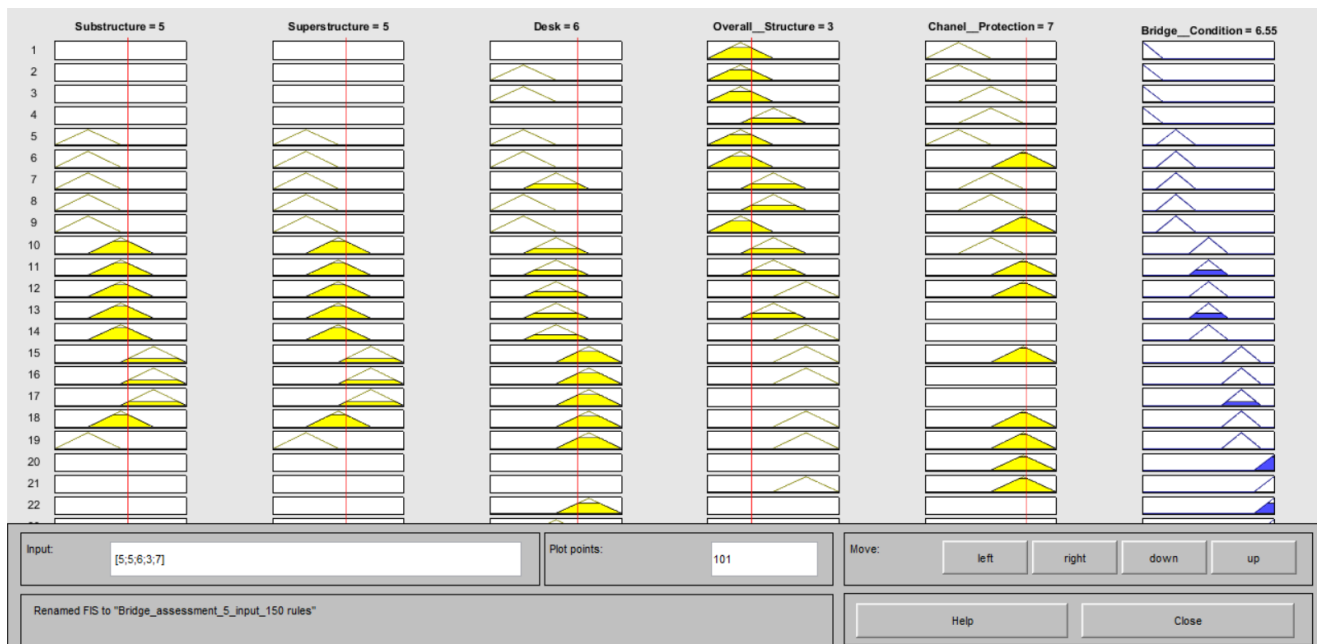


Рис. 4.6. Приклад розрахунку показника Bridge Condition для мосту 4

Джерело: розроблено автором

Substructure та Superstructure мають оцінку 5, що відповідає задовільному або посередньому стану конструкцій. Deck (проїзна частина) має значення 6 - це помірно добрий стан, без очевидних критичних дефектів. Загальна оцінка стану надбудови (Overall Structure) дорівнює 3, що свідчить про помітне погіршення або наявність окремих серйозних проблем. Channel Protection оцінено на 7 - захист русла перебуває в доброму стані. Незважаючи на відносно добрі значення деяких компонентів, низький бал Overall Structure негативно вплинув на загальну оцінку. У результаті, система на основі встановлених правил визначила Bridge Condition як 6,55, що відповідає стану вище середнього або помірно доброму.

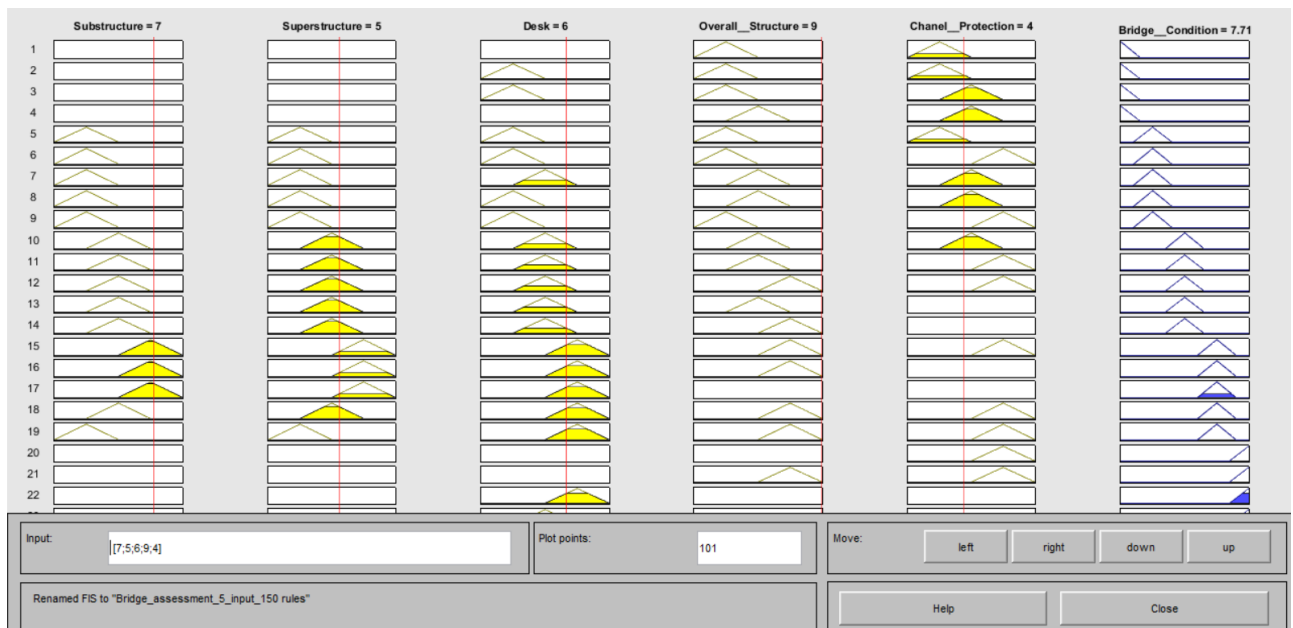


Рис. 4.7. Приклад розрахунку показника Bridge Condition для мосту 5

Джерело: розроблено автором

Substructure оцінено на 7, що свідчить про добрий стан цієї частини конструкції. Superstructure має значення 5, яке відповідає задовільному або середньому технічному стану. Desk отримав оцінку 6 - це помірне значення, яке може свідчити про наявність окремих дефектів, але загалом не критичних. Загальна оцінка Overall Structure дорівнює 9, що вказує на дуже добрий структурний стан мосту в цілому. Натомість Chanel Protection має лише 4, що вказує на проблеми із захистом русла. Попри неідеальний стан окремих елементів, зокрема Chanel Protection, система на основі активованих правил визначила, що загальний технічний стан мосту (Bridge Condition) дорівнює 7,71, що відповідає рівню «добрий».

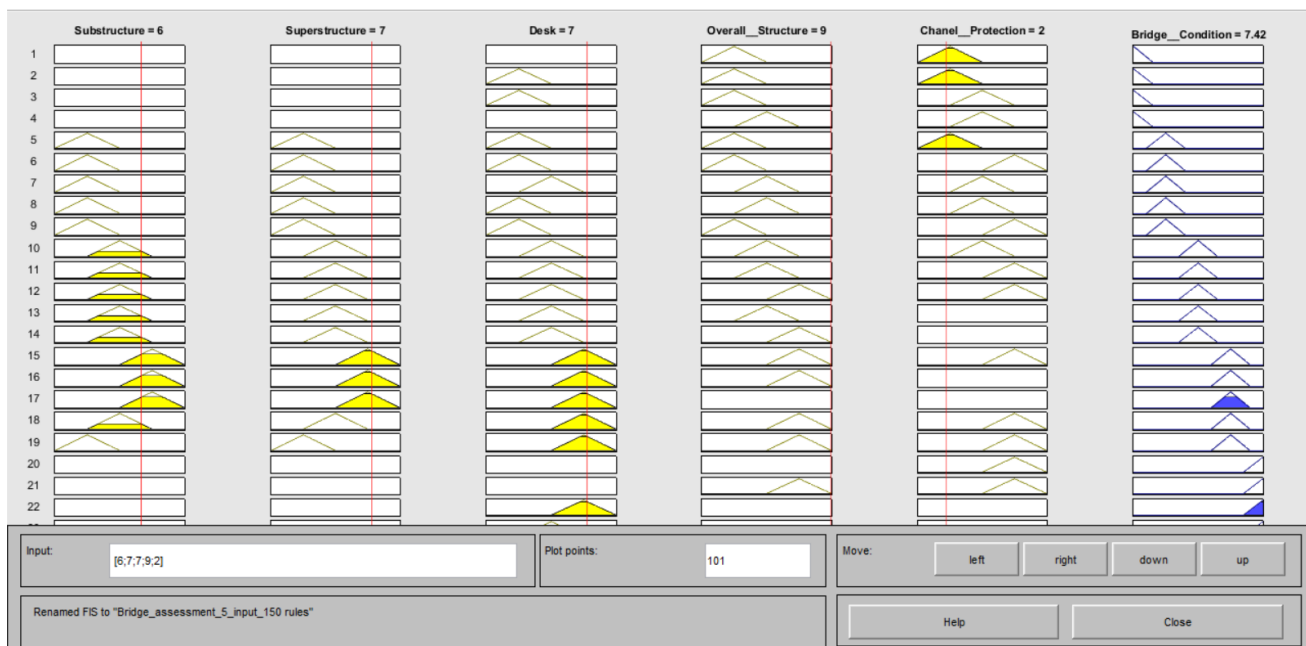


Рис. 4.8. Приклад розрахунку показника Bridge Condition для мосту 6

Джерело: розроблено автором

Substructure та Superstructure мають високі значення (6 і 7 відповідно), що вказує на їх добрий стан. Desk оцінено на рівні 7 – це також свідчить про належний технічний стан проїзної частини мосту. Загальна оцінка конструкції (Overall Structure) становить 9, тобто міст загалом у дуже хорошому стані. Натомість Channel Protection має низьке значення – лише 2, що свідчить про серйозні проблеми із захистом русла. Незважаючи на високі оцінки основних конструктивних елементів, низьке значення захисту русла частково знижує підсумкову оцінку. У результаті система, на основі активованих правил, визначила значення Bridge Condition як 7,42, що відповідає доброму загальному стану мосту.

Розроблена система нечіткої логіки типу Mamdani демонструє високий потенціал для практичного застосування в задачах комплексної оцінки технічного стану мостових споруд. Врахування п'яти ключових індикаторів – стану підбудови (Substructure), надбудови (Superstructure), проїзної частини (Desk), загального структурного стану (Overall Structure) та захисту русла (Channel Protection) – дозволяє здійснювати гнучкий аналіз об'єкта з

урахуванням експертних знань та нечітких (неповних або суб'єктивних) вхідних даних.

Нечітка модель забезпечує:

- адаптивність до різних інженерних контекстів;
- можливість врахування нечітких або мовних оцінок (наприклад, «задовільний», «незадовільний»);
- прозорість логіки прийняття рішень через явну базу правил (у даному випадку – 150 правил);
- автоматизовану побудову інтегральної оцінки стану мосту (Bridge_Condition) з чітким виходом.

Завдяки використанню трикутних функцій належності та центроїдного методу дефазифікації модель успішно виконує узагальнення інженерних показників, що підтверджується отриманням логічного результату, узгодженого з експертною оцінкою. Наприклад, для вхідного набору [6; 7; 7; 9; 2] було отримано інтегральну оцінку 7.42, що відповідає доброму або задовільному технічному стану мосту при загалом високих показниках несучих елементів і локальних проблемах з русловим захистом.

Таким чином, розроблена модель може бути ефективним інструментом для інженерів, експертів і структур, що займаються моніторингом стану мостів, особливо в умовах обмежених або неповних даних. Її можна інтегрувати в системи підтримки прийняття рішень, автоматизовані інспекційні платформи або цифрові паспорти об'єктів інфраструктури.

4.3. Формування комплексу прикладних програм для реалізації алгоритму оцінювання стану будівель та інженерних споруд із ПС

Наступний етап дослідження передбачає проведення кореляційного аналізу взаємозв'язку між вхідними змінними ($x_1, x_2, \dots, x_{16}$) та похибкою моделі. Кореляційний аналіз між вхідними змінними і похибкою є важливим

етапом діагностики моделі, який дозволяє: покращити точність моделі; краще зрозуміти структуру помилок; виявити впливові або проблемні змінні; вдосконалити архітектуру моделі. Метою кореляційного аналізу є:

1. Виявлення змінних, які впливають на похибку моделі. Якщо змінна має високу кореляцію (позитивну або негативну) з похибкою, це може свідчити про систематичне недопрацювання моделі саме при певних значеннях цієї змінної.

2. Виявлення упущених закономірностей. Висока кореляція між вхідною ознакою та похибкою може вказувати на те, що модель не враховує нелінійний або складніший зв'язок, або що використана архітектура мережі недостатньо гнучка для врахування ролі цієї змінної.

3. Діагностика пере- або недонавчання. Якщо жодна з вхідних змінних не має суттєвої кореляції з похибкою, це може бути позитивним сигналом – модель працює стабільно. Якщо навпаки – кілька змінних мають сильний зв'язок з похибками, можливо модель перенавчилася на певні патерни і погано узагальнює, або не навчається добре на певних ділянках простору ознак.

5. Визначення потенційно "шумових" змінних. Якщо змінна має низький або нульовий кореляційний зв'язок з метою (output), але високу з похибкою, — можливо, вона є шумом або вносить деструктивний вплив. Такі змінні доцільно вилучати, або ж обробляти інакше (наприклад, зменшити вагу, видалити мультиколінеарність тощо).

Рис. 4.9. демонструє кореляційну матрицю, в якій показано ступінь взаємозв'язку (лінійної кореляції) між вхідними змінними $x_1, x_2, \dots, x_{16}$ та похибкою моделі (error). Матриця є симетричною: наприклад, значення кореляції між x_1 і x_2 однакове, що й між x_2 і x_1 .

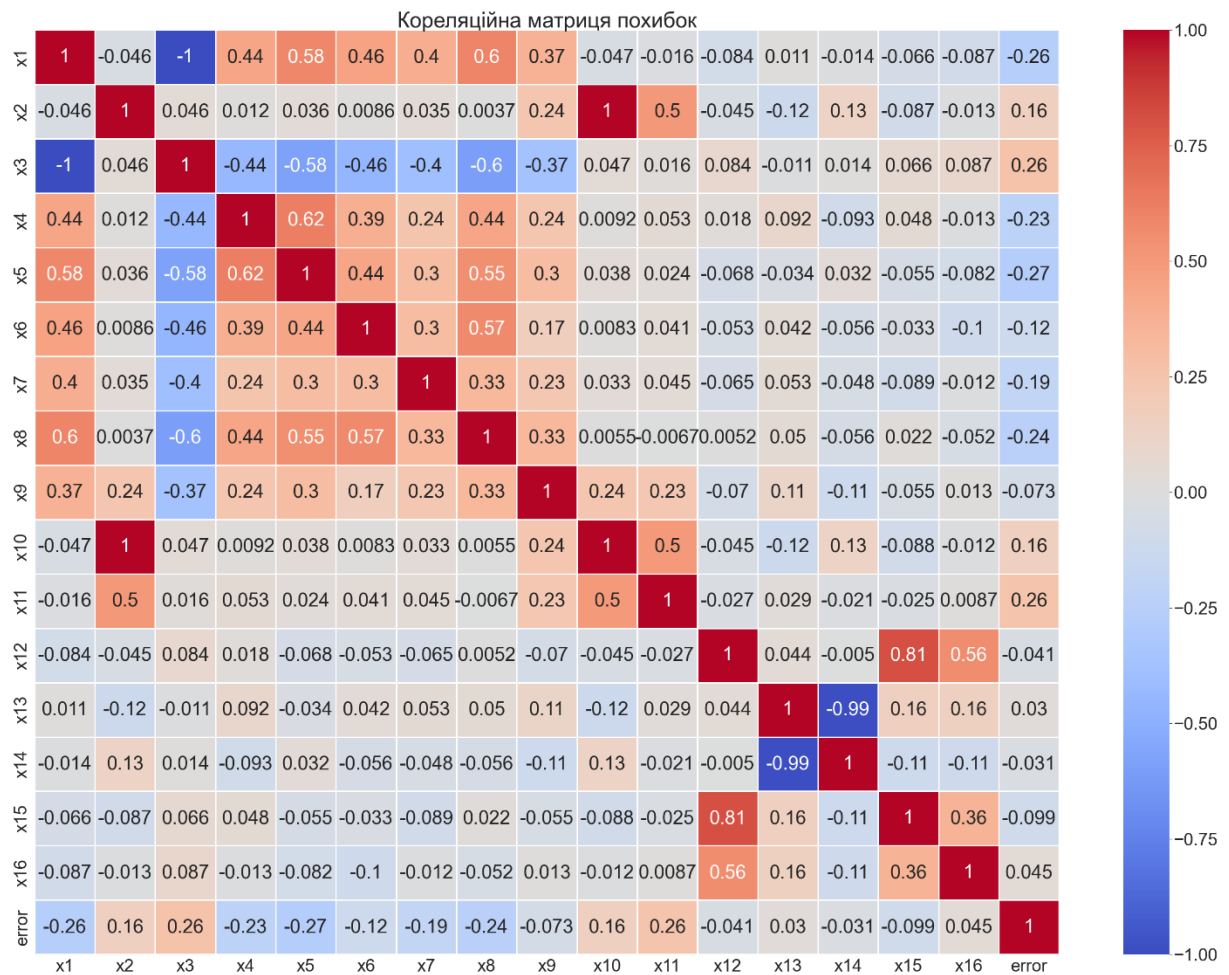


Рис. 4.9. Кореляційна матриця похибок. Джерело: розроблено автором.

Значення в клітинках – це коефіцієнти кореляції Пірсона $r \in [-1,1]$, при чому:

- значення 1 вказує на ідеальна позитивну кореляцію;
- значення (-1) вказує на ідеальна негативну кореляцію;
- значення 0 вказує на відсутність лінійного зв'язку.

Колір також показує величину і знак кореляції:

- червоний – сильна позитивна кореляція;
- синій – сильна негативна кореляція;
- світло-сірий – слабка або відсутня кореляція.

Найсильніший негативний зв'язок можна спостерігати у змінних x_5 (–0,27), x_1 (–0,26), x_4 (–0,23), x_8 (–0,24), тобто збільшення цих ознак пов'язане зі

зменшенням похибки моделі. Можна припустити, що ці змінні допомагають покращити точність моделі. Найсильнішу позитивну кореляцію можна спостерігати у змінних x_3 , x_{11} , x_2 , x_{10} : до $\sim +0,26$. Це може свідчити про те, що збільшення цих ознак призводить до збільшення похибки, тобто вони можуть бути шумовими або неінформативними.

Вхідні змінні x_{13} і x_{14} показують дуже сильну негативну кореляцію ($-0,99$), тобто майже лінійну залежність. Змінна x_{12} сильно корелює з x_{15} ($0,81$) та x_{16} ($0,56$). Такі сильні зв'язки можуть бути ознакою мультиколінеарності, яку слід враховувати при побудові моделі.

Ознаки з високою кореляцією з похибкою (наприклад, x_1 , x_4 , x_5 , x_8) можуть бути використані для зниження похибки – їх варто зберегти в моделі. Ознаки з високою кореляцією між собою (наприклад, x_{13} та x_{14}) – можуть бути об'єднані або одна з них – виключена для зниження надмірності. Ознаки з позитивною кореляцією з похибкою – варто перевірити на релевантність або відфільтрувати.

На рис. 4.10 у вигляді теплової матриці показано кореляцію між вхідними змінними (x_1 - x_{16}) та вихідною змінною (y , Оцінка стану).

Вхідна змінна x_6 має найвищу позитивну кореляцію з y ($\approx 0,85$), що вказує на сильний прямий зв'язок – зі збільшенням x_6 значення y теж зростає. Змінні x_4 , x_8 , x_5 , x_1 - також демонструють помітну позитивну кореляцію (у межах $0,88 - 0,64$), що вказує на їх важливість у прогнозуванні y . Вхідні змінні x_2 , x_{10} , x_{11} , x_{12} , x_{13} , x_{15} , x_{16} – показують дуже низькі або майже нульові коефіцієнти ($\approx -0,01$ до $0,08$), що вказує на слабкий або відсутній лінійний зв'язок з y . Змінна x_3 має помітну негативну кореляцію з y ($-0,48$), тобто при збільшенні x_3 значення y зменшується – можливо, це важлива інверсна залежність, а x_{14} , x_{16} мають слабку негативну кореляцію, що може бути незначущим. Таким чином, змінні x_6 , x_4 , x_8 , x_5 , x_1 – є ключовими предикторами y і мають найбільший вплив на результат моделі.

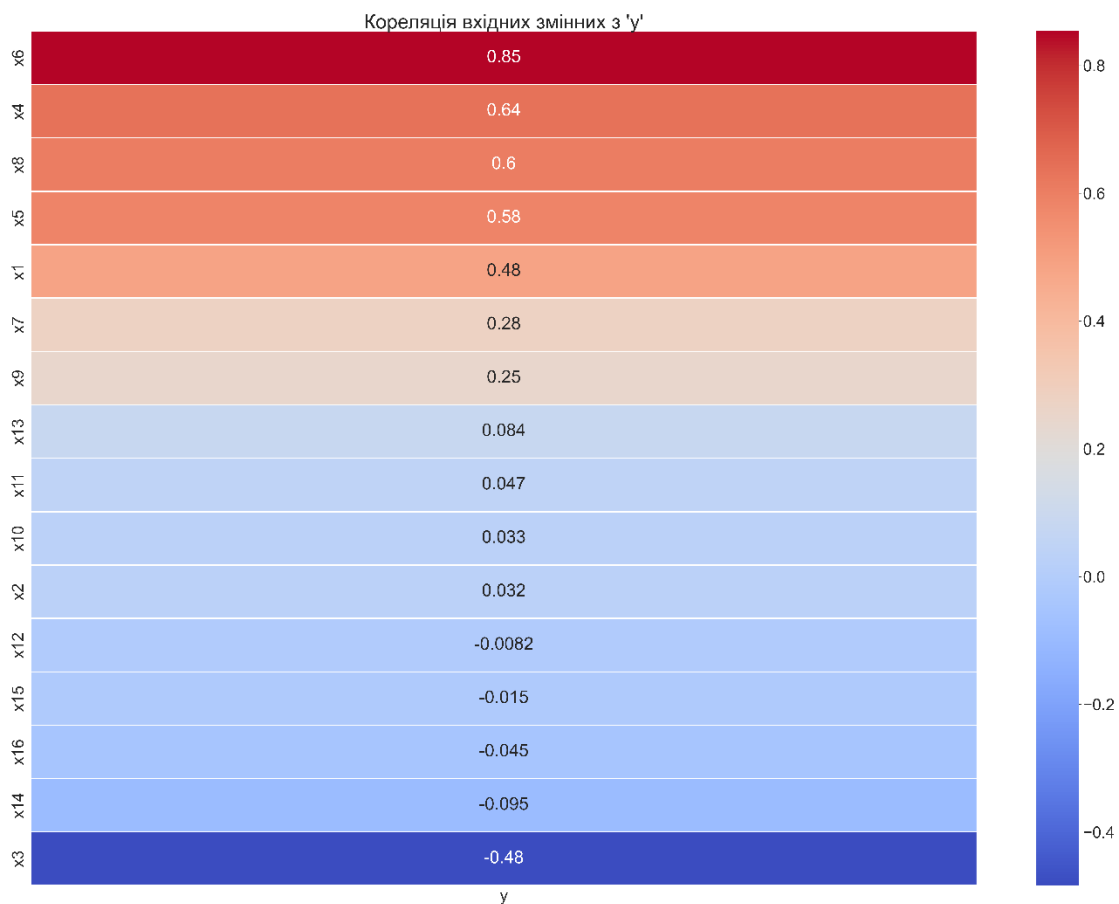


Рис. 4.10. Теплова матриця кореляції між вхідними змінними ($x_1 - x_{16}$) та вихідною змінною (y). Джерело: розроблено автором

У відповідності до запропонованого у розділі 2 підходу щодо оптимізації гіперпараметрів штучної нейронної мережі було застосовано алгоритм Байєсівської оптимізації. Результати оптимізації представлені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Результати Байєсівської оптимізації гіперпараметрів штучної нейронної мережі Джерело: розроблено автором

Ітерація	Ціль	L2-регуляризація	Швидкість навчання	Кількість нейронів у прихованому шарі 1	Кількість нейронів у прихованому шарі 2	Кількість нейронів у прихованому шарі 3
1	-0,09196	0,03752	0,009512	102,3	44,74	11,74
2	-0,08117	0,01568	0,000675	115,2	44,85	24,99

Продовження табл. 4.4

Ітерація	Ціль	L2- регуляризація	Швидкість навчання	Кількість нейронів у прихованому шарі 1	Кількість нейронів у прихованому шарі 2	Кількість нейронів у прихованому шарі 3
3	-0,07522	0,002156	0,009702	111,9	26,19	12,36
4	-0,05879	0,01842	0,003112	82,38	36,73	14,99
5	-0,1589	0,06122	0,001481	60,05	33,59	18,95
6	-0,07825	0,03865	0,00203	81,17	37,07	14,5
7	-0,05197	0,006793	0,002732	85,23	37,22	16,72
8	-0,1022	0,0525	0,00139	86,49	33,39	14,18
9	-0,09765	0,02674	0,001788	82,53	36,45	19,44
10	-0,1053	0,07119	0,00117	83,99	39,03	15,8
11	-0,0908	0,006458	0,005341	85,58	37,19	17,98
12	-0,1078	0,01703	0,009923	84,04	36,18	17,05
13	-0,1019	0,06752	0,005502	84,72	37,32	17,04
14	-0,114	0,07284	0,006708	127,5	35,52	20,93
15	-0,1145	0,01345	0,007399	60,93	25,1	13,44
16	-0,0872	0,02721	0,006551	37,97	51,86	31,02
17	-0,0483	0,01647	0,001101	54,84	59,79	27,08
18	-0,1065	0,07777	0,00364	112,4	60,86	11,91
19	-0,08605	0,05061	0,005165	108	31,86	30,14
20	-0,1133	0,0864	0,005764	71,96	24,8	14,75
21	-0,117	0,06252	0,007654	68,82	25,12	28,1
22	-0,0981	0,05666	0,0006164	66,96	23,84	11,72
23	-0,09721	0,05365	0,008036	111,3	42,37	21,11
24	-0,04071	0,006956	0,0007854	46,71	32,23	16,96
25	-0,08558	0,04371	0,001596	87,5	50,79	11,26
26	-0,08909	0,02367	0,006279	113,6	56,89	27,46
27	-0,09816	0,04322	0,008367	92,38	22,24	8,69
28	-0,1257	0,09841	0,003811	51,79	51,71	24,19
29	-0,1517	0,0651	0,008531	68,13	62,18	13,03
30	-0,1075	0,0464	0,007637	102	59,3	10,52

Оптимальні параметри ШНМ:

- L2-регуляризація 0,0069
- Швидкість навчання 0,00078
- Кількість нейронів у прихованому шарі 1 – 46
- Кількість нейронів у прихованому шарі 2 – 32
- Кількість нейронів у прихованому шарі 3 – 16

Оптимальною виявилася структура з вхідним шаром із 16 нейронів, першим прихованим шаром із 64 нейронами, другим прихованим шаром із 32 нейронами, третім прихованим шаром із 16 нейронами та вихідним шаром з 1 нейроном (рис. 4.11).

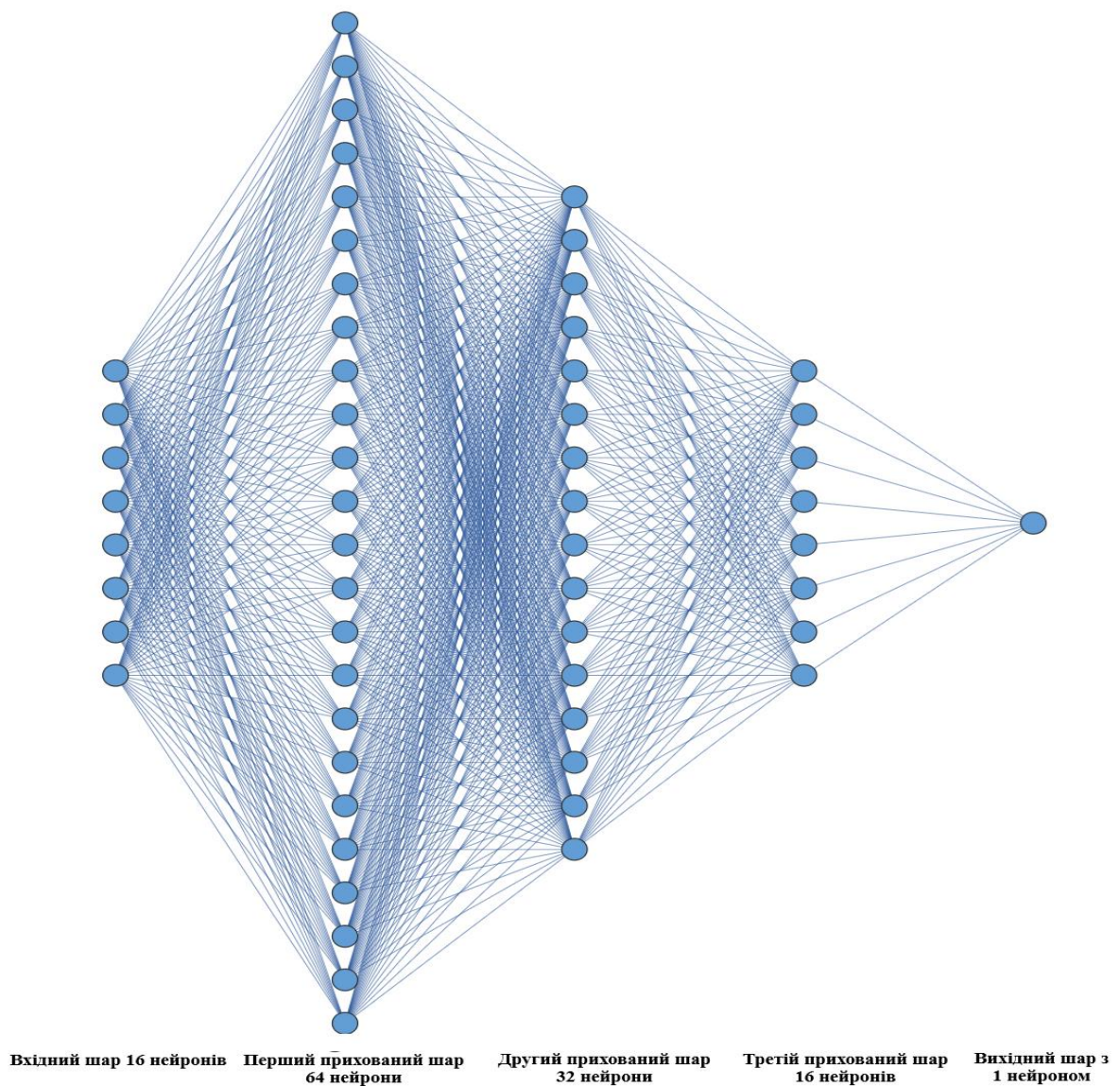


Рис. 4.11. Оптимальна структура ШНМ. Джерело: розроблено автором

Наступним етапом була перевірка, як навчена модель прогнозує показник Оцінка стану та порівняння реального значення з прогнозованим. Набір даних містив 25 записів, по два записи для кожного рівня оцінки від 1 до 8 та один запис для оцінки 9 (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 демонструє результати прогнозування показника оцінки стану за допомогою моделі штучної нейронної мережі. Вона порівнює реальні значення стану з прогнозованими і показує відхилення в процентах, що є важливою метрикою точності моделі.

а. Стан 1. Прогнозовані значення знаходяться в діапазоні від 0,1037 до 1,383, відхилення є високим - 38,3%, 53,71%, 89,63%. Модель має низьку точність для оцінки об'єктів зі станом 1. Ймовірно, таких прикладів було недостатньо у тренувальному наборі або їх особливості були погано представлені у вхідних ознаках.

б. Стан 2. Прогнозовані значення дуже близькі один до одного - 2,033, 2,041, 1,9992. Відхилення є мінімальним і знаходяться в діапазоні від 0,04% до 2,05%. Модель дуже добре прогнозує цей клас, отже дані цього класу добре описані.

с. Стан 3. Відхилення є мінімальним і знаходяться в діапазоні від 1,25% до 8,74%. В цілому точність є високою, хоча один випадок (8,74%) може свідчити про деяку варіативність у структурі даних.

д. Стан 4. Відхилення знаходяться в діапазоні 0,91%, 7,12%, 8,74%. Модель демонструє середній рівень точності, з двома менш точними прогнозами. Можливо, дані цього класу трохи змішані або нечітко відокремлені в ознаковому просторі.

е. Діапазони стану 5–9. Відхилення здебільшого менше ніж 1–2%, іноді навіть $< 0,1\%$. Для станів 5–9 модель працює дуже точно та стабільно. Можливо, ці класи мали достатньо навчальних прикладів або чітко розмежовані у вхідному просторі.

Таблиця 4.5

Порівняння реальних і прогнозованих значень показника Оцінка стану

<i>x1</i>	<i>x2</i>	<i>x3</i>	<i>x4</i>	<i>x5</i>	<i>x6</i>	<i>x7</i>	<i>x8</i>	<i>x9</i>	<i>x10</i>	<i>x11</i>	<i>x12</i>	<i>x13</i>	<i>x14</i>	<i>x15</i>	<i>x16</i>	Реальне значення	Прогно- зоване значення	Відхи- лення, %
1976	20	46	7	7	1	7	0	6	30	0	76	18,4	15	4225	1431,38	1	1,383	38,3
1985	50	37	1	1	7	8	0	5	75	1	77	17,3	31	4643	1076,38	1	0,1037	89,63
1938	19790	84	6	1	6	6	0	0	29685	198	77	16,2	47	4355	1210,12	1	0,4629	53,71
1973	100	49	7	7	2	7	2	5	150	1	76	19,5	6	4317	1325,87	2	2,033	1,65
1960	50	62	7	7	2	6	2	5	75	1	79	19,4	10	4738	1381,25	2	2,041	2,05
1965	490	57	7	7	2	7	2	4	735	5	77	17,3	33	4649	1148,89	2	1,9992	0,04
1970	151	52	5	5	3	5	0	0	262	8	80	20,3	3	5197	1403,16	3	2,7377	8,74
1954	490	68	6	6	3	7	2	4	735	5	78	19,1	8	4599	1293,02	3	2,9377	2,08
1960	490	62	7	7	3	7	2	4	735	5	77	17,3	31	4643	1076,38	3	2,9625	1,25
1959	270	63	4	4	4	5	4	6	405	3	75	17,7	25	4277	1191,47	4	3,7151	7,12
1980	490	42	7	7	4	8	4	6	735	54	75	18,6	16	4198	1088,31	4	3,9638	0,91
1957	400	65	4	5	5	6	5	5	600	4	75	18,6	16	4198	1088,31	4	3,6503	8,74
1924	4650	98	5	5	5	8	5	4	6975	326	79	19,9	5	4891	1458,74	5	5,0473	0,95
1980	40	42	6	6	5	8	4	5	60	0	79	19,9	5	4891	1458,74	5	4,9447	1,11
1955	490	67	6	6	5	6	4	4	735	201	80	20,3	3	5197	1403,16	5	4,9847	0,31
1974	44870	48	7	7	6	6	6	9	67305	449	76	20	3	4432	1557,81	6	5,9682	0,53
1960	3510	62	6	6	7	6	5	3	5265	35	76	20	3	4432	1557,81	6	5,9177	1,37

Продовження табл. 4.5

<i>x1</i>	<i>x2</i>	<i>x3</i>	<i>x4</i>	<i>x5</i>	<i>x6</i>	<i>x7</i>	<i>x8</i>	<i>x9</i>	<i>x10</i>	<i>x11</i>	<i>x12</i>	<i>x13</i>	<i>x14</i>	<i>x15</i>	<i>x16</i>	<i>Реальне значення</i>	<i>Прогно- зоване значення</i>	<i>Відхи- лення, %</i>
1989	580	33	7	7	6	8	6	7	870	6	80	20,3	3	5197	1403,16	6	5,9919	0,13
1977	46410	45	7	7	7	8	7	9	69615	464	78	20,4	4	4824	1481,42	7	6,9835	0,24
2015	3170	7	7	8	7	8	7	2	4755	32	76	20	3	4432	1557,81	7	6,9691	0,44
1984	19480	38	7	7	7	8	7	9	29220	195	76	20	3	4432	1557,81	7	6,9756	0,35
2018	17550	4	8	8	8	8	8	9	23250	527	76	17,2	36	4474	1115,61	8	7,9511	0,61
2009	7670	13	8	8	8	8	8	9	11505	77	77	16,4	43	4521	1263,46	8	7,9678	0,4
2003	6580	19	8	8	8	7	7	6	9870	66	77	17,3	33	4649	1148,89	8	7,9933	0,08
2019	3897	3	9	9	9	8	9	9	6140	39	77	16,4	43	4521	1263,46	9	8,9538	0,51

Можна зробити загальний висновок, що модель показує високу точність прогнозування для більшості станів, особливо від 2 до 9. Стан 1 – найскладніший для моделі, має значні похибки, що може бути викликано дисбалансом даних, поганою представленістю класу або слабкою інформативністю ознак для цього стану.

Рис. 4.12 демонструє порівняння реальних і прогнозованих значень показника Оцінка стану.

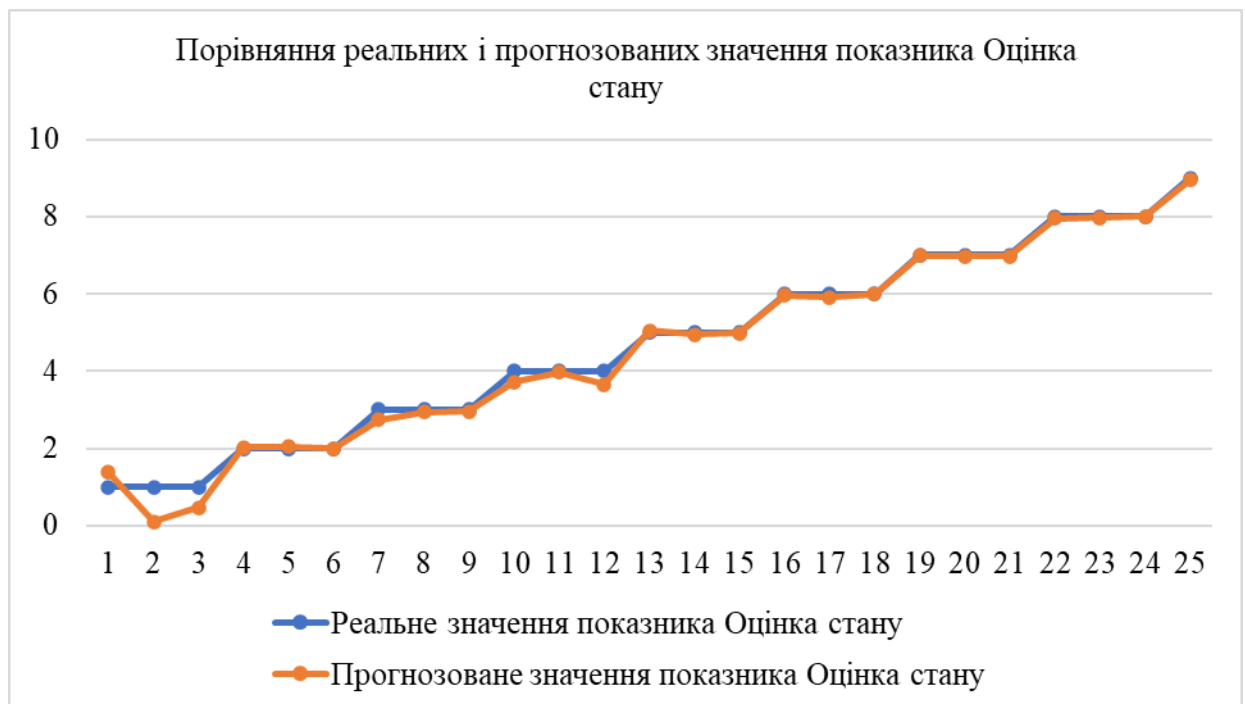


Рис. 4.12. Порівняння реальних і прогнозованих значень показника Оцінка стану

Як видно з графіка, після класу стану 2 модель прогнозує з дуже високою точністю – прогнозовані значення майже ідеально повторюють реальні. Значні відхилення спостерігаються лише в класах стану 1, де модель значно недооцінює значення (прогнози значно нижчі за реальність).

На рис. 4.13 показано відхилення прогнозу від реальних значення показника Оцінка стану.



Рис. 4.13. Відхилення прогнозу від реальних значення показника Оцінка стану, %

Гістограма чітко показує, що найбільші відхилення спостерігаються у перших трьох прикладах (від 38% до 89%). Починаючи з 4-го прикладу (тобто з класу стану 2), відхилення не перевищує 9%, а в більшості – менше 1%. Це свідчить про високу стабільність і точність моделі для станів від 2 до 9.

На підставі досліджень, що відображені в даному розділі, було запроваджено алгоритм оцінювання технічного стану будівель та інженерних споруд в складі ДПВ.

1. Підготовчий етап – формування технічного завдання, вибір методів обстеження та створення бази початкових даних про конструкцію мосту.
2. Створення BIM-моделі споруди у середовищі Revit або аналогічних платформах як цифрового двійника для інтеграції даних оцінювання.
3. Організація сенсорної інфраструктури: встановлення контактних та безконтактних датчиків, систем візуального та лазерного контролю, підключення каналів передачі даних.

4. Безперервний збір даних у реальному часі з сенсорів та візуальних систем, їх передача на сервери ПС.

5. Алгоритмічна обробка первинної інформації: фільтрація шумів, нормалізація, формування матриці ознак і параметрів для подальшого аналізу.

6. Моделювання технічного стану: застосування інструментів нечіткої логіки та машинного навчання для розрахунку інтегрального показника «Оцінка мосту».

7. Прогнозування розвитку дефектів з наступним виявом очікуваних змін стану споруди.

8. Інтеграція результатів у BIM-середовище з автоматичним оновленням інформаційної моделі та створенням візуалізованих карт пошкоджень.

9. Формування експертного висновку: автоматизоване генерування аналітичних звітів та рекомендацій щодо ремонту чи реконструкції.

10. Управлінські рішення та їх супровід: розробка адаптивної стратегії експлуатації та відновлення мосту з можливістю динамічного оновлення моделей і прогнозів.

У відповідності з алгоритмом складено комплекс прикладних програм, який спирається на наступні підсистеми:

1. Підсистема *збору даних* включає мережу контактних і безконтактних датчиків, лазерні сканери та візуальні інспекційні системи, що забезпечують безперервний моніторинг технічних параметрів.

2. *Аналітична підсистема* реалізує обробку та фільтрацію даних, нормалізацію індикаторів і їх інтеграцію в матрицю ознак для подальшого аналізу.

3 Підсистема *нечіткої логіки* оцінює ключові компоненти мосту (надбудову, проїзну частину, загальний стан конструкції та захист русла),

формуючи інтегральну оцінку за допомогою трикутних функцій належності та центроїдного дефазифікатора.

4. Підсистема *прогнозування* прогнозує розвиток дефектів під дією технічних і форс-мажорних факторів.

5. *BIM-інтеграційна підсистема* автоматизує оновлення цифрової моделі мосту та створення карт пошкоджень.

6. *Підсистема результатуючих експертно-семантичних рішень* формує рекомендації для ремонтів, реконструкцій та планів експлуатації. Система адаптивна до неповних даних, прозора завдяки базі правил та придатна для інтеграції у цифрові паспорти об'єктів інфраструктури, автоматизовані інспекційні платформи й системи підтримки управлінських рішень.

Підсумком застосування комплексу програм є ідентифікація стану інженерної споруди мосту (табл. 4.6). Запропонований формат підсумкової результатуючої оцінки стану мостової споруди у 6 станів, з одночасним подання семантичної (лінгвістичної) категорії та інтервалу в балах 0–100.

Таблиця 4.6

Результуюча оцінка стану інженерної споруди

№ стану	Бальна оцінка	Семантична оцінка стану	Опис стану та рекомендовані заходи
1	[0-11]	Критично-незадовільний	Опис: присутні великі структурні ушкодження, ризик колапсу; втрачено несучу здатність локально/загалом. Дії: негайне обмеження чи закриття руху, аварійні заходи, детальне інструментальне обстеження, терміновий проєкт рятувальних заходів
2	[11-31]	Незадовільний	Значні дефекти, прогресуючі руйнування; експлуатація обмежена. Дії: обмеження навантажень, пріоритетні ремонти, введення моніторингу в підвищеному режимі
3	[31-55]	Задовільний, з локальними незадовільними	Опис: загальна придатність з локальними проблемами (корозія, тріщини, пошкодження руслового захисту). Дії: плановий ремонт

№ стану	Бальна оцінка	Семантична оцінка стану	Опис стану та рекомендовані заходи
		елементами	локальних зон, підвищена інспекційна частота, застосування прогнозування дефектів
4	[55-76]	Добрий (експлуатаційно придатний)	конструкція в цілому працездатна; незначні дефекти, не впливають на несучу здатність. Дії: регламентні роботи за графіком, підтримуючий моніторинг, документування в BIM
5	[76-98]	Високий стан надійності	Відмінний стан несучих елементів, незначні косметичні ушкодження; запас міцності високий. Дії: рідкісні інспекції, превентивне обслуговування, інтеграція результатів у довгострокове планування
6	[98-100]	Абсолютно надійна експлуатація	майже ідеальний стан, усі показники в межах нормативів, високий запас ресурсу. Дії: планова профілактика, рутинний моніторинг, архівація стану в цифровому паспорті (BIM)

Джерело: розроблено автором за підсумками використання комплексу програм

Функціональну доцільність застосування комплексу прикладних програм доведено в практиці оцінки експлуатаційної придатності мостових, фортифікаційних та інших інженерних споруд, які здійснювались будівельними компаніями «Архітектурно-будівельні новації», «Альфа-сервіс» та Інститутом місцевого розвитку.

Висновки до розділу 4.

1. У ході дослідження реалізовано інтеграцію інформаційної моделі мосту (BIM) з інтелектуальними алгоритмами оцінювання технічного стану конструкцій. Здійснено поетапний процес структурування геометричних, матеріалознавчих і експлуатаційних даних у форматі, придатному для обробки системами штучного інтелекту. Розроблено механізм екстракції ключових параметрів моделі, які мають критичне значення для діагностики,

таких як локалізація дефектів, деформаційні характеристики, дані про навантаження та стан опорних елементів. Це дало змогу забезпечити високу ступінь автоматизації процесів аналізу та зменшити ризик втрати інформації на етапі передачі даних між цифровою моделлю та алгоритмами оцінювання. Таким чином, доведено практичну ефективність використання BIM як повноцінного джерела структурованих даних для систем моніторингу на основі ШІ.

2. Проведена інтеграція BIM-моделі мосту підтвердила її потенціал як основи для формування цифрового ядра інтелектуальної системи технічного обслуговування. У рамках роботи створено узгоджену структуру даних, яка охоплює повний життєвий цикл об'єкта – від проектування до експлуатаційного аналізу. Реалізовано синхронізацію просторових і технічних параметрів з аналітичними модулями на базі машинного навчання, що дозволило забезпечити автоматичне оновлення стану конструкції на основі сенсорних і візуалізаційних даних. Для прогнозування показника Оцінка стану запропоновано використання алгоритму, що включає 5 етапів: створення BIM-моделі мосту у середовищі Revit; формування скрипту на Python, який вивантажує потрібні параметри в таблицю CSV; очищення, стандартизація і нормалізація даних; формування матриці у якій $X_1 - X_n$ (вхідні параметри), а Y (оцінка стану мосту); завантаження даних на вхід до моделей штучного інтелекту.

3. За допомогою алгоритму Bayesian Optimization визначено оптимальну структуру ШНМ, яка складається з вхідного шару із 16 нейронів, першого прихованого шару із 64 нейронами, другого прихованого шару із 32 нейронами, третього прихованого шару із 16 нейронами та вихідного шару з 1 нейроном.

4. Після проходження всіх етапів навчання та валідації модель була розгорнута у продукційному середовищі для подальшого використання у практичних завданнях. Розгортання включає інтеграцію моделі в існуючі

програмні платформи або інформаційні системи управління інфраструктурою. Порівняльний аналіз реальних значень оцінки стану мосту з прогнозованими, довів що модель показує високу точність прогнозування для більшості станів, особливо від 2 до 9. Стан 1 – найскладніший для моделі, має значні похибки, що може бути викликано дисбалансом даних, поганою представленістю класу або слабкою інформативністю ознак для цього стану.

5. Найвагоміші результати четвертого розділу дисертаційної роботи – алгоритм та комплекс прикладних програм. Поданий в роботі інноваційний алгоритм оцінювання технічного стану мостових споруд, що відзначається багатостадійною структурою та інтеграцією вдосконалених мережевих моделей із цифровими аналітичними технологіями в контексті девелоперського проєкту відновлення. Алгоритм забезпечує комплексний підхід – від формування вихідних даних і створення BIM-моделі цифрового двійника споруди до впровадження сенсорної інфраструктури для моніторингу в реальному часі. Застосування методів нечіткої логіки, машинного навчання та байесівської оптимізації дає змогу формувати інтегральну оцінку стану об'єкта, прогнозувати розвиток дефектів і створювати карти пошкоджень із високою точністю. Алгоритм забезпечує автоматизоване оновлення цифрової моделі та формування експертних рекомендацій для девелопера, що підвищує достовірність діагностики, швидкість реагування та ефективність управлінських рішень. Це формує адаптивну основу підвищення надійності й ресурсоефективності інфраструктурних об'єктів у цифровому середовищі.

6. Створено інтегрований програмний комплекс для оцінювання технічної надійності інженерних споруд, який реалізує запропонований алгоритм і забезпечує визначення потенціалу подальшої безпечної експлуатації об'єктів. Архітектура комплексу включає функціональні модулі, що підтримують 10-стадійну модель аналізу технічного стану з

використанням штучного інтелекту, оптимізаційних моделей та нейронних мереж для технічної діагностики мостових конструкцій. Забезпечено замкнений цикл обробки інформації – від збору та передачі даних до їх аналітичного опрацювання в режимі реального часу. Це дозволяє своєчасно виявляти критичні відхилення у стані споруд, підвищувати точність прогнозування та досягати високого рівня відповідності між фактичними змінами й прогнозними результатами, що є основою для впровадження цифрових рішень у системах управління девелоперськими проєктами відновлення.

ВИСНОВКИ

Дисертацію присвячено вирішенню науково-прикладного завдання розробки організаційно-технологічних моделей та інструментарію формалізованого оцінювання технічного стану будівель і споруд – на ґрунті інтелектуальних інформаційних систем в складі девелоперського проєкту їх відновлення. Запропонований інструментарій ґрунтується на інтеграції мережових моделей вдосконаленого типу, BIM-моделювання, методів штучного інтелекту, моделей нечіткої логіки та сценарно-імітаційного коригування, що забезпечує створення адекватного цифрового опису об'єктів оцінювання та забезпечує обґрунтованість рішень наступного відновлення будівель і споруд.

Значення результатів дисертації для науки полягає у вдосконаленні науково-методичного базису та організаційно-технологічних моделей формалізованого опису здійснення оцінки технічного стану в складі девелоперських проєктів відновлення будівель і споруд. Запропоновано інноваційний підхід до оцінки технічного стану конструкцій із використанням цифрових платформ, BIM-моделювання, сенсорної інфраструктури та алгоритмів штучного інтелекту, що забезпечує створення цифрових двійників споруд і формування прогнозів розвитку дефектів. Удосконалено мережеву модель девелоперського проєкту відновлення мостів шляхом інтеграції цифрової, організаційно-технологічної та організаційно-управлінської моделі типу «робота-матриця», представлено у вигляді «цифрового багатогранника», що формалізовано охоплює всі стадії проєкту та поєднує інструменти технічної діагностики й ІС із методами цифровізації та організаційного інжинірингу. Параметрична основа моделі підвищує ефективність системного управління відновленням інженерних споруд. Представлені результати роботи доповнюють теоретичну базу наукової галузі «Технологія та організація промислового і цивільного будівництва» в

частині цифровізації процесів оцінювання технічного стану, формалізації організаційно-технологічних рішень та підвищення ефективності систем відновлення інженерних споруд.

Значення результатів дисертації для практики полягає у створенні та впровадженні організаційно-технологічних моделей і цифрового інструментарію для комплексного оцінювання та прогнозування технічного стану інженерних будівель і споруд. Запропонована система базується на вдосконалених цифрових, мережових моделях, сенсорних мережах, технологій комп'ютерного зору, глибокого навчання, BIM-моделювання, що забезпечує оперативне виявлення пошкоджень, оцінювання ризиків та планування відновлювальних заходів у режимі реального часу. Подані в роботі моделі дозволяють автоматизувати процеси аналізу технічного стану конструкцій в складі ДПВ та формування цифрових двійників об'єктів, підвищуючи точність діагностики та прогнозування. Створений на ґрунті результатів дисертації комплекс прикладних програм сприяє оптимізації програм технічного обслуговування, зменшенню витрат на інспекцію, підвищенню безпеки експлуатації та скороченню термінів ухвалення управлінських рішень. Ці результати є новітньою прикладною основою прийняття рішень для дорожньо-мостових організацій, підприємств житлово-комунального господарства, органів технічного нагляду та девелоперських структур, що займаються реконструкцією та відновленням інфраструктурних об'єктів. Розроблений інструментарій створює підґрунтя для цифрової трансформації систем управління життєвим циклом та середовища девелопменту для проєктів відновлення інженерних споруд.

Результати дослідження дозволили сформулювати наступні висновки.

1. Аналіз численних досліджень і публікацій підтвердив доцільність застосування технологій штучного інтелекту (ШІ) для моніторингу технічного стану мостів. Використання ШІ підвищує ефективність моніторингу, забезпечує точну оцінку стану транспортних споруд, прогнозує

потенційні пошкодження, а також оптимізує планування технічного обслуговування й ремонту. Для забезпечення надійної експлуатації як нових, так і існуючих мостів необхідно впроваджувати сучасні системи обстеження й оцінки технічного стану з використанням ІІІ. Це дозволяє своєчасно реагувати на зміни в умовах експлуатації, гарантуючи безпеку.

2. На підставі проведеного аналізу джерел з галузі та предмету дослідження провідну категорію дослідження «оцінка технічного стану будівельних конструкцій з використанням інтелектуальних інформаційних систем» визначено як «комплексний інженерно-цифровий процес, спрямований на безперервне спостереження, діагностику та прогнозування стану конструкцій за допомогою вдосконалених діджитал-адаптованих, мережових моделей, BIM-моделювання, сенсорної аналітики та інших компонентів інтелектуальних аналітичних систем». Такий підхід забезпечує адаптацію до умов експлуатації, своєчасне виявлення критичних відхилень і підвищує точність рішень щодо експлуатації, реконструкції чи відновлення об'єктів. Його впровадження в девелоперські проєкти дозволяє створити замкнений цикл цифрового управління технічним станом споруд.

3. Провідним науковим результатом дослідження є мережева організаційно-технологічна модель формалізованого опису девелоперського проєкту відновлення мостових споруд, репрезентована в роботі у вигляді «цифрового багатогранника». Кожна грань багатогранника відповідає цифровій мережевій моделі типу «робота-матриця», параметри якої відображають характеристики виконання робіт та специфіку девелоперського середовища організацій-учасників. Така структуризація дозволяє комплексно представити всі ключові стадії реалізації проєкту: від формування організаційно-адміністративного середовища, підготовчих заходів та оцінки технічного стану споруди до моделювання, регламентації, підбору виконавців, складання кошторисів, виконання будівельних робіт і

завершального технічного та бюджетного контролю. Модель забезпечує системність управління відновленням мостів у цифровому середовищі.

4. Система параметрів мережевої моделі має унікальність у тому, що охоплює повний спектр характеристик девелоперського проєкту відновлення – від технічних і ресурсних до організаційних та управлінських. Вона включає опис конструктивних особливостей мосту, масової частки сталі, BIM-моделей, план-графіків і кошторисів, ресурсних відомостей, складу працівників та їх компетенцій. Водночас система виходить за межі традиційного технічного підходу, оскільки містить детальну оцінку надійності організацій-виконавців, рівня їхньої управлінської спроможності, цифрової культури та зрілості, а також готовності до виконання завдань проєкту. Параметри відображають не лише внутрішні характеристики процесу будівництва, а й зовнішні чинники – ризики зриву постачання, стійкість до загроз, рівень технологічної інноваційності, індекс ритмічності виконання робіт. Окремо враховуються показники енергоємності, вуглецевого сліду, автоматизації та цифрового моніторингу, що дозволяє інтегрувати екологічні та техногенні аспекти. Такий багатовимірний опис створює параметричне цифрове ядро ДПВ, що забезпечує системність, гнучкість і надійність управління проєктом відновлення мостових споруд.

5. Розроблено триступеневий цифровий інструментарій для підвищення ефективності моніторингу стану будівель та інженерних споруд та забезпечення більш точної оцінки їх технічного стану. Інструментарій базується на інтеграції мережевої моделі нового типу, цифрових технологій, BIM-моделювання та інтелектуальних алгоритмів, що дає змогу здійснювати діагностику об'єктів у режимі реального часу. Перший рівень охоплює автоматизоване збирання й обробку даних від сенсорів і безпілотних літальних апаратів із використанням комп'ютерного зору та глибокого навчання. Другий рівень – моделювання параметрів стану конструкцій на основі BIM та SCADA-систем із залученням штучного інтелекту. Третій

рівень – інтеграція інтелектуальних моделей у системи управління проєктом відновлення, що дозволяє підвищити точність прогнозів, оптимізувати обслуговування та знизити експлуатаційні ризики.

6. Інноваційність розробленого в роботі алгоритму оцінювання технічного стану мостових споруд полягає у його багатостадійній структурі, інтеграції вдосконалених мережевих моделей з цифровими, аналітичними технологіями у контексті девелоперського проєкту відновлення. Алгоритм поєднує формування бази вихідних даних, створення BIM-моделі споруди як цифрового двійника та розгортання сенсорної інфраструктури для безперервного збору інформації. Використання методів нечіткої логіки та машинного навчання забезпечує формування інтегральної оцінки стану мосту, а байесівська оптимізація дає змогу прогнозувати розвиток дефектів із високою точністю. Автоматизоване оновлення цифрової моделі дозволяє створювати карти пошкоджень у реальному часі та інтегрувати їх у систему управління проєктом. Важливо, що алгоритм не обмежується технічною діагностикою, а формує експертні висновки й рекомендації для девелопера, підвищуючи достовірність діагностики, оперативність реагування й ефективність управлінських рішень. Це створює адаптивну основу для підвищення надійності та ресурсоефективності відновлення інфраструктурних об'єктів у цифровому середовищі.

7. Розроблено й впроваджено у практику девелоперських проєктів інтегрований програмний комплекс, призначений для оцінювання технічної надійності інженерних споруд і визначення потенціалу їх подальшої безпечної експлуатації. Архітектура комплексу включає функціональні модулі, що підтримують 10-стадійну модель аналізу технічного стану об'єктів із застосуванням штучного інтелекту, реалізують адаптацію до умов об'єкта за допомогою моделі оптимізації, забезпечують застосування нейронних мереж для розв'язання задач технічної діагностики мостових конструкцій. Створено замкнений цикл обробки інформації, що включає

безперервне зчитування, передавання, накопичення та аналітичне опрацювання даних у режимі реального часу. Завдяки цьому забезпечується висока точність і швидкість виявлення критичних відхилень у поведінці об'єктів, а використання алгоритмів машинного навчання на основі сенсорної та візуальної інформації дозволяє досягти високого рівня відповідності між фактичними змінами та результатами прогнозування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rowland I. D. Vitruvius and his Influence. *A Companion to Roman Architecture*. 2013. С. 412–425.
2. Neville A. M. Properties of concrete. 1995.
3. Pöllmann H., Snellings R., Valentini L. Cement and Concrete—Past, Present, and Future. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*. 2022. Вип. 18, № 5. С. 295–299.
4. Moussard M., Garibaldi P., Curbach M. The invention of Reinforced concrete (1848–1906). Springer, 2018. ISBN 3-319-59470-2.
5. Verloove F., Ardenghi N. New distributional records of non-native vascular plants in northern Italy. *Natural History Sciences*. 2015. Вип. 2, № 1. С. 5–14.
6. Hellebois A., Launoy A., Pierre C., De Lanève M., Espion B. 100-year-old Hennebique concrete, from composition to performance. *Construction and Building Materials*. 2013. Вип. 44. С. 149–160.
7. Trach R., Ryzhakova G., Trach Y., Shpakov A., Tyvoniuk V. Modeling the Cause-and-Effect Relationships between the Causes of Damage and External Indicators of RC Elements Using ML Tools. *Sustainability*. 2023. Вип. 15, № 6. С. 5250.
8. Hewson N. R. Prestressed concrete bridges: design and construction. Thomas Telford, 2003. ISBN 0-7277-3223-4.
9. Gaganelis G., Mark P., Forman P. Optimization Aided Design: Reinforced Concrete. John Wiley & Sons, 2022. ISBN 3-433-61070-3.
10. Технічний комітет стандартизації «Будтехнології» ДСТУ 9273:2024 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість. 2024.
11. Fabianowski D., Jakiel P., Stemplewski S. Development of artificial neural network for condition assessment of bridges based on hybrid decision

making method – Feasibility study. *Expert Systems with Applications*. 2021. Вип. 168. С. 114271.

12. Bodnar L., Koval P., Stepanov S., Panibratets L. Operational state of bridges of Ukraine. *Avtoshliakhovyk Ukrayiny*. 2019. № № 2 (258). 2019. С. 57–68.

13. Дружинін М., Малихін М., Кацюба І., Кирик Я., Степанюк Р. Інтеграція прикладних модулів ipd до складу організаційно-технологічних інструментів управління будівництвом. *Містобудування та територіальне планування*. 2024. № 86. С. 261–271.

14. Shi J., Fang W., Wang Y., Zhao Y. Measurements and analysis of track irregularities on high speed maglev lines. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 2014. Вип. 15, № 6. С. 385–394.

15. Pourzeynali S., Zhu X., Ghari Zadeh A., Rashidi M., Samali B. Comprehensive Study of Moving Load Identification on Bridge Structures Using the Explicit Form of Newmark- β Method: Numerical and Experimental Studies. *Remote Sensing*. 2021. Вип. 13, № 12. С. 2291.

16. Караван В. В., Борисюк О. П., Філіпчук С. В. Технічний стан та залишковий ресурс залізобетонних мостів на автомобільних дорогах у місті рівне. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2022. № 39. С. 237–244.

17. Wang A., Zhang Z., Lei X., Xia Y., Sun L. All-Weather Thermal Simulation Methods for Concrete Maglev Bridge Based on Structural and Meteorological Monitoring Data. *Sensors*. 2021. Вип. 21, № 17. С. 5789.

18. Беленкова О., Дубінін Д., Давид К. Цифрова трансформація будівництва і девелопменту територій як імператив формування стратегій учасників будівельного процесу. *Містобудування та територіальне планування*. 2022. № 81. С. 13–22.

19. Szymanek S. Construction production trends and industry optimism in EU countries after the COVID-19 pandemic. *Acta Sci. Pol. Architectura*. 2022. Вип. 21, № 4. С. 21.
20. Rashidi M., Samali B., Sharafi P. A new model for bridge management: Part A: condition assessment and priority ranking of bridges. *Australian Journal of Civil Engineering*. 2016. Вип. 14, № 1. С. 35–45.
21. Frangopol D. M., Kong J. S., Gharaibeh E. S. Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2001. Вип. 15, № 1. С. 27–34.
22. Wakjira T. G., Nehdi M. L., Ebead U. Fractional factorial design model for seismic performance of RC bridge piers retrofitted with steel-reinforced polymer composites. *Engineering Structures*. 2020. Вип. 221. С. 111100.
23. Rokneddin K., Ghosh J., Dueñas-Osorio L., Padgett J. E. Bridge retrofit prioritisation for ageing transportation networks subject to seismic hazards. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2013. Вип. 9, № 10. С. 1050–1066.
24. Хоменко О., Рижакова Г., Малихіна О., Петренко Г., Степанюк Р. Цільові пріоритети та формалізовані індикатори трансформації операційних систем стейкхолдерів будівництва. *Управління розвитком складних систем*. 2023. № 56. С. 173–180.
25. Й.Й. Лучко, А.І. Лантух-Лященко, П.М. Коваль, та ін. Мости: Конструкції та надійність. Львів: Каменяр, 2005.
26. Боднар Л. П. Програмний комплекс АЕСУМ. Сучасний стан та концепція подальшого розвитку. *Дороги і мости*. 2010. Вип. 12. С. 31–39.
27. Chupryna I., Ryzhakova G., Chupryna K., Biloshchytskyi A., Tormosov R., Gonchar V. Designing a toolset for the formalized evaluation and selection of reengineering projects to be implemented at an enterprise. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Вип. 1, № 13(115). С. 6–19.

28. Трач Р., Стрілецький П. Застосування інформаційного моделювання протягом життєвого циклу мостового об'єкту. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2022. № 41. С. 216–223.
29. Bolukbasi M., Mohammadi J., Arditi D. Estimating the Future Condition of Highway Bridge Components Using National Bridge Inventory Data. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2004. Вип. 9, № 1. С. 16–25.
30. Yin Z., Li Y., Guo J., Li Y. Integration Research and Design of the Bridge Maintenance Management System*. *Procedia Engineering*. 2011. Вип. 15. С. 5429–5434.
31. Wan C., Zhou Z., Li S., Ding Y., Xu Z., Yang Z., Xia Y., Yin F. Development of a Bridge Management System Based on the Building Information Modeling Technology. *Sustainability*. 2019. Вип. 11, № 17. С. 4583.
32. Yarnold M. T., Moon F. L. Temperature-based structural health monitoring baseline for long-span bridges. *Engineering Structures*. 2015. Вип. 86. С. 157–167.
33. Tennyson R. C., Mufti A. A., Rizkalla S., Tadros G., Benmokrane B. Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors. *Smart Materials and Structures*. 2001. Вип. 10, № 3. С. 560–573.
34. Xu D., Xu X., Forde M. C., Caballero A. Concrete and steel bridge Structural Health Monitoring—Insight into choices for machine learning applications. *Construction and Building Materials*. 2023. Вип. 402. С. 132596.
35. Wan S., Guan S., Tang Y. Advancing Bridge Structural Health Monitoring: Insights into Knowledge-Driven and Data-Driven Approaches. *Journal of Data Science and Intelligent Systems*. 2023. Вип. 2, № 3. С. 129–140.
36. Караван В.В., Борисюк О.П., Філіпчук С. Технічний стан залізобетонного моста на автомобільній дорозі Т-14-04 ЧЕРВОНОГРАД – РАВА-РУСЬКА. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2022. № 40. С. 251–259.

37. Goldstein S., Princiotta D., Naglieri J. A. Handbook of intelligence. *Evolutionary theory, historical perspective, and current concepts*. 2015. Вип. 10. С. 978–1.
38. Stepaniuk R. BIM 4D–7D як основа інтегрованого управління життєвим циклом об'єктів у промисловому та цивільному будівництві. *Ways to Improve Construction Efficiency*. 2024. Вип. 3, № 53. С. 262–274.
39. Rose D. E. A symbolic and connectionist approach to legal information retrieval. Psychology Press, 2013. ISBN 0-203-77344-6.
40. Zhou J., Chen F., Berry A., Reed M., Zhang S., Savage S. A Survey on Ethical Principles of AI and Implementations. Canberra, ACT, Australia:IEEE, 2020. ISBN 978-1-7281-2547-3.
41. Bostrom N. The control problem. Excerpts from superintelligence: Paths, dangers, strategies. *Science Fiction and Philosophy: From Time Travel to Superintelligence*. 2016. С. 308–330.
42. Bishop C. M., Nasrabadi N. M. Pattern recognition and machine learning. Springer, 2006.
43. Ryan M. In AI we trust: ethics, artificial intelligence, and reliability. *Science and Engineering Ethics*. 2020. Вип. 26, № 5. С. 2749–2767.
44. Analytics M. Global survey: The state of AI in 2020. *McKinsey Digital*. 2020.
45. Kurzweil R. What Is Artificial Intelligence Anyway? As the techniques of computing grow more sophisticated, machines are beginning to appear intelligent—but can they actually think? *American Scientist*. 1985. Вип. 73, № 3. С. 258–264.
46. Annex A., Rules C. National BIM Standard-United States® Version 3. *National Institute of Building Sciences buildingSMART Alliance*. 2015.
47. Graves A., Wayne G., Danihelka I. Neural turing machines. *arXiv preprint arXiv:1410.5401*. 2014.

48. Горда О. Топологія інформаційного простору в будівництві. *Будівельне виробництво*. 2020. Вип. 70. С. 39–44.
49. Baker C. L., Saxe R., Tenenbaum J. B. Action understanding as inverse planning. *Cognition*. 2009. Вип. 113, № 3. С. 329–349.
50. Гайдило Д. Моделі та методи розвитку інформаційного моделювання в будівництві. 2023.
51. Graziano M. S. *Consciousness and the social brain*. Oxford University Press, 2013. ISBN 0-19-992864-9.
52. Бордюг В. Будівельне інформаційне моделювання як засіб управління вартістю будівництва. 2022.
53. Дружинін М., Малихін М., Степанюк Р. Науково-прикладні засади організаційно-технологічного моделювання девелоперських проектів у форматі стратегічних інновацій. *Містобудування та територіальне планування*. 2024. № 87. С. 193–205.
54. Li X., Wu P., Shen G. Q., Wang X., Teng Y. Mapping the knowledge domains of Building Information Modeling (BIM): A bibliometric approach. *Automation in Construction*. 2017. Вип. 84. С. 195–206.
55. Costin A., Adibfar A., Hu H., Chen S. S. Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Automation in Construction*. 2018. Вип. 94. С. 257–281.
56. Velankar M. R., Mahalle P. N., Shinde G. R. Rethinking Machine Learning and Deep Learning. *Cognitive Computing for Machine Thinking*. Singapore:Springer Nature Singapore, 2024. С. 25–41.
57. Bradley A., Li H., Lark R., Dunn S. BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. *Automation in Construction*. 2016. Вип. 71. С. 139–152.

58. Дружинін М., Степанюк Р., Антипенко Е. Формування аналітичних компонент інтегрованої реалізації будівельного проекту як цифрової екосистеми. *Просторовий розвиток*. 2024. № 10. С. 287–300.
59. Oraee M., Hosseini M. R., Papadonikolaki E., Palliyaguru R., Arashpour M. Collaboration in BIM-based construction networks: A bibliometric-qualitative literature review. *International Journal of Project Management*. 2017. Вип. 35, № 7. С. 1288–1301.
60. Santos R., Costa A. A., Grilo A. Bibliometric analysis and review of Building Information Modelling literature published between 2005 and 2015. *Automation in Construction*. 2017. Вип. 80. С. 118–136.
61. Charef R., Alaka H., Emmitt S. Beyond the third dimension of BIM: A systematic review of literature and assessment of professional views. *Journal of Building Engineering*. 2018. Вип. 19. С. 242–257.
62. Zhao X. A scientometric review of global BIM research: Analysis and visualization. *Automation in Construction*. 2017. Вип. 80. С. 37–47.
63. Hille F., Herrmann R., Schneider R., Pitters S., Wedel F., Hindersmann I. Developing a guideline for structural health monitoring of road bridges in Germany. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Digitalization and Sustainability*. CRC Press, 2024. С. 2009–2017.
64. Дзьобань О., Соснін О. Інформаційне суспільство як мережево-комунікативний простір управління. *Віче*. 2015. № 10. С. 7–13.
65. Brühwiler E., Vogel T., Lang T., Lüchinger P. Swiss standards for existing structures. *Structural Engineering International*. 2012. Вип. 22, № 2. С. 275–280.
66. Дружинін М., Степанюк Р., Гергі М., Малихін М., Сторожук О., Костенко Д. Цифрові моделі організації будівництва на ґрунті інтеграційного підходу та SMART-управління. *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 60. С. 165–173.

67. Flaig K., Lark and R. The development of UK bridge management systems. Thomas Telford Ltd, 2000. ISBN 0965-092X.
68. Highways England CS 450. Inspection of Highway Structures. Version 0.1.0. 2021.
69. Highways England CS 454. Assessment of highway bridges and structures. Version 1.1.0. 2020.
70. Mahut B., Woodward R. Comparison of bridge management practice in England and France. Thomas Telford Publishing, 2005.
71. Бензель О., Лавріненко Л. Інформаційне моделювання сталевих будівлі з підвищеними вимогами жорсткості. 2021.
72. FHWA F. National bridge inspection standards (nbis). *Federal Register*. 2009. Вип. 69. С. 239.
73. Fesun A., Konchakivskyi O., Stepaniuk R., Ryzhakova G., Fedorova Y. Conceptual and analytical features of ensuring business resilience of enterprises in the multiproject environment of construction development. *Building production*. 2024. № 77. С. 58–66.
74. NCHRP N. S. 375: Bridge Inspection Practices. *Washington DC: National Cooperative Highway Research Program*. 2007.
75. Lu P. FHWA Bridge Preservation Research Roadmap. United States. Department of Transportation. Federal Highway Administration ..., 2024.
76. Graybeal B. A., Phares B. M., Rolander D. D., Moore M., Washer G. Visual Inspection of Highway Bridges. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2002. Вип. 21, № 3. С. 67–83.
77. Liu H., Zhang Y. Bridge condition rating data modeling using deep learning algorithm. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2020. Вип. 16, № 10. С. 1447–1460.
78. Phares B. M., Washer G. A., Rolander D. D., Graybeal B. A., Moore M. Routine Highway Bridge Inspection Condition Documentation Accuracy and Reliability. *Journal of Bridge Engineering*. 2004. Вип. 9, № 4. С. 403–413.

79. Thompson P. D., Small E. P., Johnson M., Marshall A. R. The Pontis bridge management system. *Structural engineering international*. 1998. Вип. 8, № 4. С. 303–308.
80. Thompson P. National-scale bridge element deterioration model for the USA. *Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges*. CRC Press, 2018. С. 2373–2379.
81. Melhem M., Caprani C., Ng A. Bridge management in Australia and New Zealand: Current approaches and future needs. *Maintenance, safety, risk, management and life-cycle performance of bridges*. 2018. С. 1845–1851.
82. Барабаш М. С., Київська К. І. Використання методів інтеграції для створення узагальненої інформаційної моделі будівельного об'єкта. 2016.
83. Shirato M., Tamakoshi T. Bridge inspection standards in Japan and US. 2013.
84. Адаменко В. Використання 3D BIM-інформаційного моделювання при проєктуванні, розрахунках та конструюванні металевих конструкцій. 2021.
85. General Director of National Roads and Motorways Instructions for conducting road inspections of engineering structures. 2011.
86. Степанюк Р.Б. А. Є. Ю. Структурно-динамічна трансформація операційної системи підприємств будівельного девелопменту: аналітико-прикладні аспекти. *Просторовий розвиток*. Вип. 11. С. 510–521.
87. General Director of National Roads and Motorways Principles of using the scale of point assessments of the technical condition and suitability for use of road engineering structures. 2019.
88. Наказ Міністерства регіонального розвитку та будівництва України від 11.11.2009 р. № 484 ДБН В.2.3-6:2009 «Мости та труби. Обстеження і випробування». 2009.

89. Технічний комітет стандартизації «Будування мостів» ДСТУ 9181:2022 Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. 2022.
90. Fan W., Chen Y., Li J., Sun Y., Feng J., Hassanin H., Sareh P. Machine learning applied to the design and inspection of reinforced concrete bridges: Resilient methods and emerging applications. *Structures*. 2021. Вип. 33. С. 3954–3963.
91. Чопорова О., Чопоров С., Лісняк А. Використання машинного навчання для прогнозування напружено-деформованого стану круглої пластинки. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2021. Вип. 4, № 2.2. С. 196–205.
92. Kiani J., Camp C., Pezeshk S. On the application of machine learning techniques to derive seismic fragility curves. *Computers & Structures*. 2019. Вип. 218. С. 108–122.
93. Кравченко С., Гришкун Є., Власенко О. Методи класифікації машинного навчання з використанням бібліотеки scikit-learn. *Вчені записки Таврійського національного університету імені ВІ Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020.
94. Грицюк П., Гаврилюк М. Використання машинного навчання для управління процесами аграрної економіки. 2023.
95. Lavreniuk M., Novikov A. Огляд методів машинного навчання для класифікації великих обсягів супутникових даних. *System research and information technologies*. 2018. № 1. С. 52–71.
96. Danylyuk I. Перспективи застосування методу машинного навчання для моделювання мовної особистості. *Лінгвістичні студії*. 2017. С. 159–164.
97. Hassan A. M., Adel K., Elhakeem A., Elmasry M. I. S. Condition Prediction for Existing Educational Facilities Using Artificial Neural Networks and Regression Analysis. *Buildings*. 2022. Вип. 12, № 10. С. 1520.

98. Zhao H., Ding Y., Li A., Sheng W., Geng F. Digital modeling on the nonlinear mapping between multi-source monitoring data of in-service bridges. *Structural Control and Health Monitoring*. 2020. Вып. 27, № 11.
99. Yang D. Y. Deep Reinforcement Learning–Enabled Bridge Management Considering Asset and Network Risks. *Journal of Infrastructure Systems*. 2022. Вып. 28, № 3. С. 04022023.
100. Pena-Caballero C., Kim D., Gonzalez A., Castellanos O., Cantu A., Ho J. Real-Time Road Hazard Information System. *Infrastructures*. 2020. Вып. 5, № 9. С. 75.
101. Zhang Y., Li Y., Zhou X., Luo J. cST-ML: Continuous spatial-temporal meta-learning for traffic dynamics prediction. IEEE, 2020. ISBN 1-7281-8316-2.
102. Hajializadeh D. Deep learning-based indirect bridge damage identification system. *Structural health monitoring*. 2023. Вып. 22, № 2. С. 897–912.
103. Jeong Y., Kim W., Lee I., Lee J. Bridge inspection practices and bridge management programs in China, Japan, Korea, and US. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*. 2018. Вып. 3, № 2. С. 126–135.
104. Hammouch W., Chouiekh C., Khaissidi G., Mrabti M. Crack Detection and Classification in Moroccan Pavement Using Convolutional Neural Network. *Infrastructures*. 2022. Вып. 7, № 11. С. 152.
105. Stepaniuk R. Digital transformation of monitoring and assessment of building structures and facilities using intelligent SHM solutions. *Colloquium-journal/Technical sciences*. 2025. №53 (246), pp. 39-42. doi.org/10.5281/zenodo.15720737. URL: <https://zenodo.org/records/15720737>.
106. Dziecioł J., Sas W. Perspective on the Application of Machine Learning Algorithms for Flow Parameter Estimation in Recycled Concrete Aggregate. *Materials*. 2023. Вып. 16, № 4. С. 1500.

107. Nguyen T., Nguyen T., Sidorov D. N., Dreglea A. Machine learning algorithms application to road defects classification. *Intelligent Decision Technologies*. 2018. Вип. 12, № 1. С. 59–66.
108. Duan Y., Chen Q., Zhang H., Yun C. B., Wu S., Zhu Q. CNN-based damage identification method of tied-arch bridge using spatial-spectral information. *Smart Struct. Syst.* 2019. Вип. 23, № 5. С. 507–520.
109. Geng Q., Zhou Z., Cao X. Survey of recent progress in semantic image segmentation with CNNs. *Science China Information Sciences*. 2018. Вип. 61. С. 1–18.
110. Yanez-Borjas J. J., Valtierra-Rodriguez M., Machorro-Lopez J. M., Camarena-Martinez D., Amezquita-Sanchez J. P. Convolutional Neural Network-Based Methodology for Detecting, Locating and Quantifying Corrosion Damage in a Truss-Type Bridge Through the Autocorrelation of Vibration Signals. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023. Вип. 48, № 2. С. 1119–1141.
111. Yessoufou F., Zhu J. One-Class Convolutional Neural Network (OC-CNN) Model for Rapid Bridge Damage Detection Using Bridge Response Data. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2023. Вип. 27, № 4. С. 1640–1660.
112. Щепка О. Методи класифікації та кластеризації даних з використанням машинного навчання. 2023.
113. Rivera A., Le N., Kashiwagi J., Kashiwagi D. Identifying the Global Performance of the Construction Industry. *Journal for the Advancement of Performance Information and Value*. 2016. Вип. 8, № 2. С. 7.
114. Степанюк Р.Б. ВІМ-орієнтована модель моніторингу технічного стану будівельних конструкцій на основі інтелектуальних інформаційних систем (розділ 6.1). *Організаційно-технологічний девелопмент та інтегрована реалізації проєктів в будівництві*. 2024. С. 164–174.
115. Gerrits L., Chang R. A., Pagliarin S. Case-based complexity: within-case time variation and temporal casing. *Complexity, Governance & Networks*. 2021. Вип. 7, № 1. С. 29–49.

116. Bolton A., Enzer M., Schooling J. The Gemini Principles: Guiding values for the national digital twin and information management framework. *Centre for digital built Britain and digital framework task group*. 2018.
117. Dang N., Shim C. Bridge assessment for PSC Girder Bridge using Digital Twins Model. *CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure*. Ред. Ha-Minh C., Dao D. V., Benboudjema F., та ін. Singapore: Springer Singapore, 2020. С. 1241–1246.
118. Assaad R., El-adaway I. H. Bridge Infrastructure Asset Management System: Comparative Computational Machine Learning Approach for Evaluating and Predicting Deck Deterioration Conditions. *Journal of Infrastructure Systems*. 2020. Вип. 26, № 3. С. 04020032.
119. Степанюк Р.Б. Організаційно-технологічне забезпечення оцінки технічного стану будівельних конструкцій у цифровому моніторингу життєвого циклу споруд (розділ 5.3). *Колективна монографія: Економіко-управлінський та організаційно-технологічний інструментарій стратегічних інновацій в будівництві*. 2025. С. 225–237.
120. Gomez-Cabrera A., Escamilla-Ambrosio P. J. Review of machine-learning techniques applied to structural health monitoring systems for building and bridge structures. *Applied Sciences*. 2022. Вип. 12, № 21. С. 10754.
121. Stepaniuk R. Advanced approaches to the assessment of the technical condition of buildings using intelligent information systems: technological efficiency and prospects for development. Praha. Publishing House «Education and Science», 2020.
122. Onyelowe K. C., Ebid A. M., Riofrio A., Baykara H., Soleymani A., Mahdi H. A., Jahangir H., Ibe K. Multi-Objective Prediction of the Mechanical Properties and Environmental Impact Appraisals of Self-Healing Concrete for Sustainable Structures. *Sustainability*. 2022. Вип. 14, № 15. С. 9573.

123. Stepaniuk R. Intelligent System-Based Digital Transformation of Engineering Diagnostics for Assessing the Structural Integrity of Buildings. *Przemysł: Nauka i studia*, 2020.
124. The BIM 5D model of the bridge built using the incremental launching method. *Archives of Civil Engineering*. 2023.
125. Stepaniuk R. Advanced Approaches to the Assessment of the Technical Condition of Buildings Using Intelligent Information Systems: Technological Efficiency and Prospects for Development. Софія: БялГРАД-БГ, 2022.
126. Wang J., Gu D., Yu Z., Tan C., Zhou L. A framework for 3D model reconstruction in reverse engineering. *Computers & Industrial Engineering*. 2012. Вип. 63, № 4. С. 1189–1200.
127. Степанюк Р.Б. Формалізація організаційно-технологічного супроводу технічного обстеження будівельних споруд із застосуванням цифрових технологій. КНУБА, 2023.
128. Alur R. Principles of cyber-physical systems. MIT press, 2015. ISBN 0-262-02911-1.
129. Степанюк Р.Б. Адаптація моделей нечіткого виведення з використанням штучних імунних систем до умов організації будівництва в проєктах післявоєнного відновлення інфраструктури. 2024.
130. Stepaniuk R. Formalization of Structural Health Monitoring using adaptive digital algorithms. 2024.
131. Figueiredo E., Brownjohn J. Three decades of statistical pattern recognition paradigm for SHM of bridges. *Structural Health Monitoring*. 2022. Вип. 21, № 6. С. 3018–3054.
132. Степанюк Р.Б. Модифікація моделей нечіткого виведення з використанням штучних імунних систем для адаптації до умов будівництва в проєктах реконструкції інфраструктури після війни. Програма та тези доповідей круглого столу «Управлінські, економічні, облікові, організаційно-

технологічні, цифрові та комунікаційні аспекти поліпшення освітнього та наукового процесів як імперативи трансформації будівельної галузі». Київ: 2024. С. 24.

133. Степанюк Р.Б. Нагальність зміни змісту топології операційних систем та організаційних структур управління будівельним підприємством на ґрунті цифровізації. Бізнес-форум *«Вектори управлінських, операційних, цифрових та технологічних трансформацій будівництва в умовах викликів воєнного часу»*. К.: КНУБА, 2024, С. 18.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України, які індексуються в міжнародних наукометричних базах:

1. Малихін М.О., **Степанюк Р.Б.**, Рижаківа Г.М., Кончаківський О.І., Ніколаєва М.Ю. Застосування інформаційного моделювання протягом життєвого циклу об'єкту будівництва. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2021. №48(2). С. 98-105. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.48\(2\)](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.48(2)). *Особистий внесок*: відображено основні кроки оновлення засад формалізованого супроводу девелоперських будівельних проєктів.

2. **Степанюк Р.Б.** Системний підхід до реконструкції інженерних споруд із використанням інтелектуальних інформаційних систем та нормативно-технічних регламентів. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2022. № 49(2). С. 159-170. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49\(2\).159-170](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.49(2).159-170)

3. **Степанюк Р.Б.**, Поколенко В.О., Ратніков Д.Г. Інтеграція інтелектуальних інформаційних систем в технологію процесів реконструкції та відновлення експлуатаційної придатності інженерних споруд. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2023. №51(2). С. 35-46. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51\(2\).35-46](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(2).35-46). *Особистий внесок*: опис інноваційного змісту цифрової мережевої організаційно-технологічної моделі опису девелоперських проєктів відновлення на ґрунті ІІС.

4. Хоменко О., Петренко Г., **Степанюк Р.** Цільові пріоритети та формалізовані індикатори трансформації операційних систем стейкхолдерів будівництва. *Управління розвитком складних систем*, 2023, (56), 173-180.

DOI: 10.32347/2412-9933.2023.56.173-180. *Особистий внесок*: розроблено структурно-функціональну модель адаптації операційного середовища до викликів сучасного будівельного девелопменту в частині побудови логіко-аналітичного ядра інтелектуальної системи моніторингу технічного стану будівельних конструкцій.

5. Дружинін М., Малихін М., **Степанюк Р.** Інтеграція прикладних модулів IPD до складу організаційно-технологічних інструментів управління будівництвом. *Містобудування та територіальне планування*, 2024, (86), 261-271. DOI: 10.32347/2076-815x.2024.86.261-271. *Особистий внесок*: запропоновано модель взаємодії IPD-компонентів з цифровими платформами управління проектами на базі BIM, що лягло в основу концептуального підходу до формалізації організаційно-технологічного середовища системи МО-ТС-БКС, розробленої у межах дисертаційного дослідження.

6. Дружинін М., Малихін М., **Степанюк Р.** Науково-прикладні засади організаційно-технологічного моделювання девелоперських проектів у форматі стратегічних інновацій. *Містобудування та територіальне планування*, 2024, (87), 193-205. DOI: 10.32347/2076-815x.2024.87.193-205. *Особистий внесок*: систематизовано методичні підходи до адаптації цифрових інструментів у контексті управління життєвим циклом об'єктів та запропоновано концепцію використання інтелектуальних інформаційних систем як елемента інноваційного супроводу та моніторингу БКС.

7. Дружинін М., **Степанюк Р.**, Антипенко Е. Формування аналітичних компонент інтегрованої реалізації будівельного проекту як цифрової екосистеми. *Просторовий розвиток*, 2024, (10), 287-300. DOI: 10.32347/2786-7269.2024.10.287-300. *Особистий внесок*: обґрунтовано та запропоновано аналітичну модель інтеграції функціональних компонент цифрової екосистеми у структуру реалізації будівельного проекту; розроблено алгоритми взаємодії модулів моніторингу технічного стану конструкцій із цифровими платформами управління, що стало

методологічною основою для формування системи організаційно-технологічного забезпечення.

8. Дружинін, М., **Степанюк, Р.**, Гергі Д. Цифрові моделі організації будівництва на ґрунті інтеграційного підходу та SMART-управління. *Управління розвитком складних систем*, 2024, (60), 165-173. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.165-173. *Особистий внесок*: сформульовано логіку побудови цифрової моделі моніторингу технічного стану конструкцій як підсистеми загального інтеграційного середовища цифрові моделі організації будівництва.

9. Фесун А.С., Кончаківський О.І., **Степанюк Р.Б.** Концептуально-аналітичні особливості забезпечення бізнес-стійкості підприємств у мультипроектному середовищі будівельного девелопменту. *Будівельне виробництво*, 2024, (77), 58-66. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.77>. URL: <https://ndibv-building.com.ua/index.php/Building/article/view/509/241>. *Особистий внесок*: сформовано прикладні положення щодо алгоритмізації технічного моніторингу конструкцій як чинника управління ризиками, що інтегровано в загальну концепцію організаційно-технологічного забезпечення життєвого циклу об'єктів будівництва.

10. **Степанюк Р.** (2024). BIM 4D–7D як основа інтегрованого управління життєвим циклом об'єктів у промисловому та цивільному будівництві. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, 2024, 53(3), 262–274. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.53\(3\).262-274](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.53(3).262-274).

11. **Степанюк Р.Б.**, Антипенко Є.Ю., Валінкевич Н.В. Структурно-динамічна трансформація операційної системи підприємств будівельного девелопменту: аналітико-прикладні аспекти. *Просторовий розвиток*, 2025, (11), 510-521. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.11.510-521. *Особистий внесок*: розроблено підходи до цифрової трансформації операційної системи девелоперських підприємств на основі інтеграції інтелектуальних модулів технічного моніторингу будівельних конструкцій. Запропоновано механізми

формалізації управлінських рішень у контексті забезпечення надійності об'єктів, що на пряму корелює з науковими результатами дисертації щодо впровадження інженерно-цифрових систем оцінки технічного стану конструкцій у девелопменті.

Статті в наукових періодичних виданнях держав ЄС:

12. **Stepaniuk R.** Digital transformation of monitoring and assessment of building structures and facilities using intelligent SHM solutions. *Colloquium-journal/Technical sciences*. 2025. №53 (246), pp. 39-42. (Польща). doi.org/10.5281/zenodo.15720737. URL: <https://zenodo.org/records/15720737>

Монографії:

13. **Степанюк Р.Б.** BIM-орієнтована модель моніторингу технічного стану будівельних конструкцій на основі інтелектуальних інформаційних систем (розділ 6.1) / Колективна монографія: *Організаційно-технологічний девелопмент та інтегрована реалізації проєктів в будівництві*. К.: ПП Сердюк В.Л., 2024. С.164-174. URL: [//repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/146a567b-c79a-4b18-81b4-be3491d0a4c3/content](http://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/146a567b-c79a-4b18-81b4-be3491d0a4c3/content)

14. **Степанюк Р.Б.** Організаційно-технологічне забезпечення оцінки технічного стану будівельних конструкцій у цифровому моніторингу життєвого циклу споруд (розділ 5.3): колективна монографія. *Економіко-управлінський та організаційно-технологічний інструментарій стратегічних інновацій в будівництві*. Київ, 2025. С. 225-237. URL: irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=S&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21FMT=fullwebr&S21ALL=%28<.>A%3DC%28%20P.%20Б.<.>%29&FT_REQUEST=&FT_PREFIX=&Z21ID=&S21STN=1&S21REF=10&S21CNR=20

Матеріали конференцій, де здійснено апробацію роботи:

15. **Stepaniuk R.** Advanced approaches to the assessment of the technical condition of buildings using intelligent information systems: technological

efficiency and prospects for development. *Materiály XVI Mezinárodní vědecko - praktická konference «Věda a vznik»*, Volume 4: Praha. Publishing House «Education and Science», 2020. P. 69-71.

16. **Stepaniuk R.** Intelligent System-Based Digital Transformation of Engineering Diagnostics for Assessing the Structural Integrity of Buildings. *Materiály XVI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Wykształcenie i nauka bez granic - 2020»*, Volume 1 Przemysł: Nauka i studia, 2020. P. 62-65.

17. **Stepaniuk R.** Advanced Approaches to the Assessment of the Technical Condition of Buildings Using Intelligent Information Systems: Technological Efficiency and Prospects for Development. *Матеріали за XVII міжнародна научна практична конференція «Новини на научний прогрес»*, 2022: Софія: Бял ГРАД-БГ. P.55-57.

18. **Степанюк Р.Б.** Формалізація організаційно-технологічного супроводу технічного обстеження будівельних споруд із застосуванням цифрових технологій. Програма круглого столу *«Налаштування освітніх траєкторій в підготовці менеджерів будівництва в контексті відбудови України»*. К.: КНУБА, 2023. С.24.

19. **Степанюк Р.Б.** Адаптація моделей нечіткого виведення з використанням штучних імунних систем до умов організації будівництва в проєктах післявоєнного відновлення інфраструктури. V Міжнародна науково-практична конференція *«Енергоощадні машини і технології»*, присвячена 60-річчю від дня заснування факультету автоматизації і інформаційних технологій КНУБА, 2024. С. 46.

20. **Stepaniuk R.** Formalization of Structural Health Monitoring using adaptive digital algorithms. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Американські стандарти освіти в Україні» в рамках проєкту «Впровадження американських стандартів освіти в Україні: громадянська участь, підвищення якості та демократичний розвиток»*, 14-15 червня 2024 року, Київ. С. 71-72.

21. **Степанюк Р.Б.** Модифікація моделей нечіткого виведення з використанням штучних імунних систем для адаптації до умов будівництва в проектах реконструкції інфраструктури після війни. Програма та тези доповідей круглого столу *«Управлінські, економічні, облікові, організаційно-технологічні, цифрові та комунікаційні аспекти поліпшення освітнього та наукового процесів як імперативи трансформації будівельної галузі»*. Київ: 2024. С. 24.

22. **Степанюк Р.Б.** Нагальність зміни змісту топології операційних систем та організаційних структур управління будівельним підприємством на ґрунті цифровізації. Бізнес-форум *«Вектори управлінських, операційних, цифрових та технологічних трансформацій будівництва в умовах викликів воєнного часу»*. К.: КНУБА, 2024, С. 18.



3-25 № 43-1 від 12.03.2025 р.

*До спеціалізованої вченої ради КНУБА
Д26.056.03.*

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження здобувача КНУБА
Степанюка Романа Борисовича на тему: *«Організаційно-технологічні моделі
відновлення будівель та інженерних споруд на основі інтелектуальних
інформаційних систем».*

Керівництво будівельної компанії «Альфа-сервіс» підтверджує ефективність практичної взаємодії зі здобувачем низького ступеня кандидата технічних наук Київського національного університету будівництва і архітектури Степанюком Романом Борисовичем упродовж 2023-2024 рр. у межах виконання девелоперського проекту відновлення мостової споруди на автомобільній дорозі М-06 Київ–Чоп (с/мт Стоянка), зруйнованої під час воєнних дій у 2022 році. У процесі проектування, організації та реалізації відновлювальних робіт були використані наукові та прикладні результати дисертаційного дослідження Степанюка Р.Б., що стосуються створення організаційно-технологічних моделей відновлення інфраструктурних об'єктів із застосуванням інтелектуальних інформаційних систем. Зокрема, впроваджено авторську цифрову модель багатофакторного управління відновленням, яка забезпечила системну інтеграцію даних із технічного оцінювання, організації виробничих і логістичних процесів, моделювання альтернативних сценаріїв виконання робіт та цифрову координацію дій між учасниками будівельного процесу.

Впроваджений Степанюком Р.Б. алгоритмічний підхід до формування організаційно-технологічної структури проекту базується на принципах параметризації, мережевого аналізу та цифрової симуляції. Це дозволило реалізувати інструменти інтелектуального планування відновлення з урахуванням технічного стану опор, прогонових конструкцій, ресурсних обмежень та часових параметрів. Важливою складовою впровадження стала цифрова платформа контролю відновлювальних робіт, розроблена на основі принципів функціонально-цифрового супроводу, що ґрунтується на розробленій здобувачем комплекс програм. Цей комплекс інтегрує наступні взаємопов'язані модулі:

1. Обстеження та оцінка технічного стану конструкцій;
2. Цифрове моделювання технологічних процесів;
3. Побудова цифрової, мережевої моделі девелоперського проекту;
4. Прогнозування ризиків і затримок;
5. Остаточна візуалізацію проектних рішень на основі BIM-технологій;

Завдяки інтеграції цих модулів у робочі процеси компанії «Альфа-сервіс» вдалося досягти підвищення точності планування, скорочення логістичних простоїв, зниження вартості відновлення на 8–10% та зменшення термінів будівництва на понад 11% у порівнянні з традиційними схемами управління. Особливої уваги заслуговує застосування методів цифрового аудиту й контролю якості, розроблених у рамках дослідження Степанюка Р.Б. Вони передбачають поєднання сенсорного моніторингу, візуальної аналітики та інтелектуального аналізу даних, що дало змогу забезпечити безперервну оцінку відповідності конструкцій та матеріалів технічним регламентам і мінімізувати ризики дефектів у процесі відновлення.

Практичне впровадження результатів дослідження підтвердило високу ефективність організаційно-цифрового супроводу проєктів відновлення, особливо в умовах воєнного та повоєнного середовища. Розроблені методи дозволили досягти стабільності виробничих процесів, оперативного управління виробничими потоками, гнучкої адаптації до змін проєктних умов та узгодження дій усіх учасників проєкту в єдиному цифровому просторі.

Впроваджені рішення Степанюка Р.Б. мають практичну цінність для державних і приватних девелоперських структур, що реалізують програми інфраструктурного відновлення. Їх застосування дозволяє підвищити технологічність управлінських процесів, забезпечити прозорість ухвалення рішень, знизити ризики зривів у графіках будівництва та гарантувати якість і безпечність відновлених споруд. Досвід компанії «Альфа-сервіс» у використанні розробок здобувача КНУБА Степанюка Р.Б. засвідчує високу ефективність інтеграції наукових результатів у практику будівництва та їх вагомий внесок у підвищення стійкості і керованості девелоперських проєктів відновлення критичної інфраструктури України.

Директор
ТОВ «Альфа-сервіс»



А.М. Кравченко

ТОВ
"Архітектурно-будівельні новації"

04119, м. Київ, вул. Дегтярівська, 25-а
(044)4830472

№72-5-25 від 14.05.2025 р./

Голові вченої ради КНУБА проф. Кулікову П.М.

**ПОВІДОМЛЕННЯ ПРО ПІДСУМКИ ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВИХ
РЕЗУЛЬТАТІВ**

в практику ТОВ «Архітектурно-будівельні новації» здобувача КНУБА
Р.Б. Степанюка, які одержані в результаті підготовки дисертації на здобуття
наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.08 –
технологія та організація промислового та цивільного будівництва.

ТОВ «Архітектурно-будівельні новації» повідомляє, що упродовж 2023–2024 років у межах реалізації девелоперських проєктів відновлення об'єктів транспортної інфраструктури, зокрема мосту у м. Вознесеньск (Миколаївська область), були впроваджені результати дисертаційного дослідження здобувача КНУБА Степанюка Романа Борисовича на тему «Організаційно-технологічні моделі відновлення будівель та інженерних споруд на основі інтелектуальних інформаційних систем» (спеціальність 05.23.08 – технологія та організація промислового та цивільного будівництва).

У процесі виконання проєкту відновлення було використано науково-методичні підходи, алгоритми та цифрові рішення, розроблені автором, які забезпечили новий рівень керованості технічними, організаційними та інформаційними процесами. Це дозволило здійснювати автоматизоване збирання, обробку та аналіз даних від сенсорів, дронів і візуальних систем у режимі реального часу, оперативно виявляти дефекти та прогнозувати динаміку їх розвитку. Завдяки використанню алгоритмів глибокого навчання та комп'ютерного зору, компанія отримала можливість здійснювати цифрову діагностику технічного стану з точністю понад 92 %, що значно підвищило ефективність прийняття управлінських рішень щодо технічного обслуговування, реконструкції та експлуатаційної безпеки мосту та дало можливість автоматично формувати звіти про поточний стан об'єкта, коригувати графіки робіт і здійснювати візуалізацію прогнозних сценаріїв поведінки споруди. Запроваджені методи забезпечили скорочення часу на діагностику на 18%, підвищення точності прогнозів технічного стану на 16% та зниження експлуатаційних ризиків на 22 %.

Розроблений у межах дисертації триступеневий цифровий інструментарій оцінювання стану в складу проекту відновлення (сенсорний збір даних – BIM/SCADA моделювання - інтелектуальний аналіз і прогнозування) став базою для побудови корпоративної системи управління станом транспортних споруд компанії. Він забезпечує наскрізне відстеження технічних показників, аналітичну підтримку прийняття рішень і формування інтегрованих цифрових звітів для державних органів контролю.

Практичне застосування напрацювань Степанюка Р.Б. дозволило компанії досягти якісного підвищення рівня цифрової зрілості в управлінні проектами відновлення, скоротити витрати на технічний нагляд і обстеження на 14 %, а також удосконалити процедури оцінки технічного стану мостів, що перебувають в експлуатації.

Завдяки розробленим автором моделям і алгоритмам забезпечено поєднання організаційно-технологічного моделювання, будівельного девелопменту, інженерної діагностики, аналітичного прогнозування та управлінського реагування в єдиному інформаційному середовищі. Це стало передумовою формування цифрової екосистеми управління об'єктами відновлення, орієнтованої на підвищення безпеки, ресурсоефективності та стійкості будівельної інфраструктури.

Керівництво ТОВ «Архітектурно-будівельні новації» підтверджує, що запроваджені рішення здобувача КНУБА Степанюка Романа Борисовича мають високу науково-прикладну цінність, відзначаються інноваційним характером використання інтелектуальних інформаційних технологій і сучасних мережевих моделей для розв'язання комплексних завдань у девелоперських проектах відновлення. Отримані результати рекомендовано до подальшого використання у практиці управління відновленням в проектах девелоперської організації

будівництва в умовах сучасних викликів.

Генеральний директор



С.М. Архіпенко

Вих. № 402/2 від 05.11.2024 р. |

ДОВІДКА
про впровадження результатів дисертаційного дослідження
Степанюка Романа Борисовича

«Інститут місцевого розвитку» (далі - Інститут) підтверджує впровадження результатів дисертаційного дослідження Степанюка Романа Борисовича на тему «Організаційно-технологічні моделі відновлення будівель та інженерних споруд на основі інтелектуальних інформаційних систем» (спеціальність 05.23.08 – технологія та організація промислового та цивільного будівництва).

Розробки автора були використані під час реалізації проекту реконструкції мосту через річку Десна у м. Чернігів, відкритого для руху в жовтні 2024 року. Попередній міст було зруйновано у березні 2022 року внаслідок бойових дій. У межах відновлювальних робіт Інститут здійснював технічне обстеження, інструментальний контроль і цифровий моніторинг стану конструкцій, що проводилися із застосуванням методичних підходів і цифрових засобів, розроблених у рамках дисертаційного дослідження Степанюка Р.Б., що було спрямоване на вдосконаленні теоретичних засад і практичного інструментарію створення організаційно-технологічних моделей відновлення будівель і споруд із використанням інтелектуальних інформаційних систем.

Практичне використання результатів дисертації відзначається високим рівнем інноваційності, зокрема завдяки впровадженню сучасних інформаційних технологій, BIM-платформ, цифрових систем моніторингу та штучного інтелекту у процеси управління девелоперськими проектами відновлення. У ході робіт зі спорудження мосту через Десну вперше було апробовано вдосконалену мережеву модель формалізованого управління проектом, яка передбачала оцінювання технічного стану конструкцій із використанням нейромережевих алгоритмів і методів нечіткої логіки.

Створена в дисертації організаційно-технологічна модель у формі «цифрового багатогранника» забезпечила комплексне охоплення всіх

етапів життєвого циклу відновлення - від первинного обстеження до планування, реалізації та контролю робіт.

Параметрична система мережевої моделі, використана на підприємстві, охоплює повний спектр характеристик девелоперського проекту — технічних, ресурсних, організаційних та управлінських. До неї входять показники професійної надійності виконавців, рівень цифрової зрілості, ступінь ризиків постачання, енергоефективність, вуглецевий слід, автоматизація виробничих процесів і показники цифрового моніторингу. Така структура формує параметричне цифрове ядро (parametric digital core), що забезпечує цілісність, адаптивність і гнучкість управління процесом відновлення.

На основі цієї моделі впроваджено інтелектуальну систему комплексного технічного обстеження, яка поєднує сенсорний збір даних, алгоритми машинного навчання, елементи нечіткої логіки та BIM-візуалізацію. Це дало змогу виконувати оперативний контроль технічного стану конструкцій, виявляти потенційні пошкодження, аналізувати динаміку навантажень і прогнозувати поведінку несучих елементів. Застосування розроблених автором моделей та комплексу програм сприяло підвищенню точності оцінки технічного стану конструкцій на 18 %, скороченню тривалості обстеження на 25 % і зменшенню експлуатаційних ризиків на 20 %.

На основі цієї моделі впроваджено інтелектуальну систему комплексного технічного обстеження, яка поєднує сенсорний збір даних, алгоритми машинного навчання, елементи нечіткої логіки та BIM-візуалізацію. Це дало змогу виконувати оперативний контроль технічного стану конструкцій, виявляти потенційні пошкодження, аналізувати динаміку навантажень і прогнозувати поведінку несучих елементів. Застосування розроблених автором моделей та комплексу програм сприяло підвищенню точності оцінки технічного стану конструкцій на 18 %, скороченню тривалості обстеження на 25 % і зменшенню експлуатаційних ризиків на 20 %.

Отримані результати довели високу ефективність комплексного цифрового підходу до управління відновлювальними проектами. Керівництво Інституту відзначає, що впровадження результатів дисертаційного дослідження Степанюка Романа Борисовича має вагоме науково-практичне значення, сприяє розвитку цифрових технологій у сфері будівництва та управління відновленням, а також формує передумови для створення інтелектуальної екосистеми цифрового управління девелоперськими проектами відновлення інфраструктури України. Авторська участь у проектах Інституту дозволила адаптувати розробки автора до нагрітих практичних потреб місцевих громад та органів місцевого самоврядування.

Виконавчий директор
д.с.н., доцент



Тормосов Р.Ю.

Стадії девелоперського проєкту відновлення мостових споруд

№	Назва стадії	Зміст стадії
1.	Формування девелоперського середовища проєкту та оргструктури адміністрування	Визначення цілей і завдань; формування системи управління проєктом; розподіл ролей і відповідальності; створення цифрово-інформаційного середовища для комунікацій і супроводу
2.	Підготовча стадія	Збір та систематизація вихідних даних; аналіз нормативної та дозвільної документації; вивчення умов ділянки розташування споруди; формування вихідних технічних завдань
3.	Оцінка технічного стану споруди	Проведення обстежень з виокремленням ПС. Класифікація елементів за експлуатаційними станами; формалізація результатів у цифрових та інтелектуальних інформаційних системах
4.	Варіативне цифрове та організаційно-технологічне моделювання циклу проєкту	Формування сценаріїв циклу, розробка BIM-моделі, планування термінів та ресурсних потреб; складання плану виконання робіт (ПВР)
5.	Регламентация	Узгодження нормативно-правових аспектів; затвердження регламентів взаємодії між стейкхолдерами; встановлення системи контролю та звітності
6..	Підбір організацій-виконавців (стейк-холдерів проєкту)	Проведення конкурсних відборів або тендерів; формування пулу підрядних і субпідрядних організацій; укладення контрактів
7.	Складання бюджету та кошторисів	Деталізація фінансового плану; складання локальних і зведених кошторисів; узгодження фінансових джерел; формування механізмів контролю витрат
8.	Виконання будівельних та спеціальних робіт	Організація та реалізація будівельно-монтажних, відновлювальних і спеціальних робіт; застосування сучасних технологій та цифрових систем моніторингу; контроль дотримання ПВР, якості та безпеки
9.	Прийняття робіт та підсумковий технічний і бюджетний контроль	Перевірка відповідності виконаних робіт проєктній документації та нормативам; підсумкова технічна експертиза; аудит кошторисів і фактичних витрат; затвердження результатів; введення об'єкта в експлуатацію

Джерело: розроблено автором



Візуалізація змісту і призначення створюваної організаційно-технологічної моделі для оцінки технічного стану в складі девелоперського проєкту відновлення мостових споруд

Джерело: розроблено автором

Додаток 6

Матриця параметрів по окремій стадії девелоперського проєкту відновлення, яка є окремою гранню мережевої моделі у вигляді «цифрового багатогранника»

1	Номер стадії	від 1 до 9	9
2	Зміст стадії		Регламентация
3	Організація-виконавець (ОВ)	Укртрансміст	
4	Тип конструкції мосту, з відображенням ширини прогонів, к-ції балок та кріплень, типів з'єднань тощо	посилання на аркуш	LBR-18-401
5	Масова частка арматури (сталі)	Тонн на 1 пог м.	483,1
6	BIM-модель виконання робіт	посилання на цифрову адресу	BMJ-4- L9Q141
7	План-графік виконання робіт	посилання на цифрову адресу	GRJ-5-56
8	Рівень сертифікованості якості виконання робіт	посилання на стандарти ISO	ISO 9001.
9	Кошторисна вартість планова	тис.грн.	841,22
10	Індекс коригування кошторисної вартості виконання робіт, з врахуванням експертних та сценарно-імітаційних алгоритмів	індекс	1,034
11	Кошторисна вартість розрахункова (скоригвана)	тис.грн.	869,82
12	Планова тривалість виконання роботи	роб.дні	41
13	Індекс коригування тривалості виконання робіт, з врахуванням експертних та сценарно-імітаційних алгоритмів	індекс	1,092
14	Розрахункова тривалість виконання роботи	роб.дні	44
15	Склад робітників	посилання на цифрову адресу	IA-12-Q113

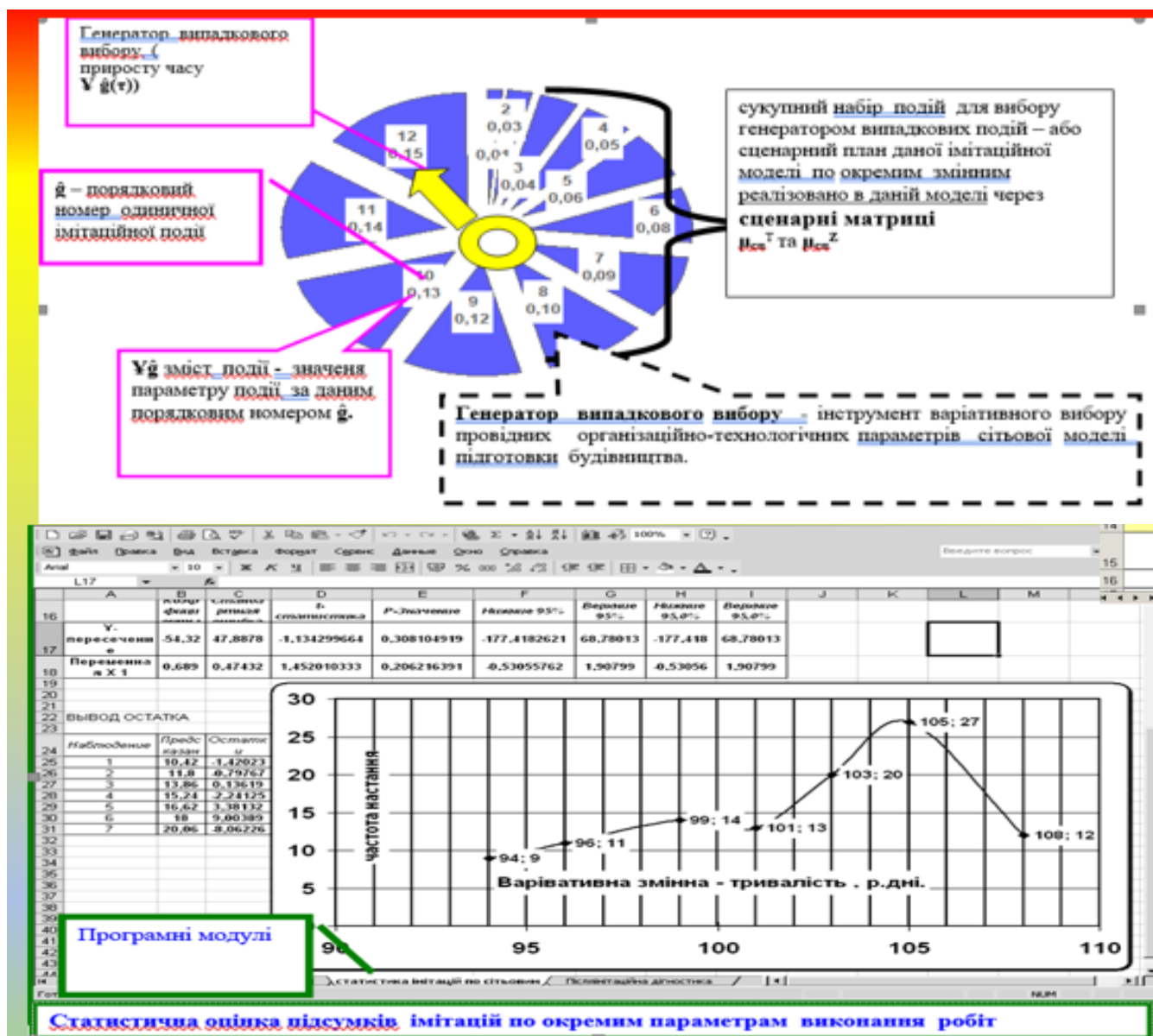
Джерело: розроблено автором.

Продовження додатку 6

16	Компетенція та фаховий склад	посилання на цифрову адресу	LF-12-F37
17	Ресурсна відомість - матеріали, вироби, комплектуючі	посилання на цифрову адресу	LR-14-Q5-115
18	Відомість потреби в машинах, механізмах	посилання на цифрову адресу	LMW-1Q5 - 139
19	Відомість потреби у вимірювальних приладах та сенсорних системах	посилання на цифрову адресу	LIS-5- 16-174
20	Кошторис на виконання робіт	посилання на цифрову адресу	L9-5-17- 233
21	Частка в загальному бюджеті девелоперського проєкту	%	3,76
22	Оцінка виконавчої готовності ОВ	Бали (макс. 100)	91,2
23	Оцінка управлінських компетенцій ОВ	Бали (макс. 100)	94,5
24	Оцінка цифрової культури та цифрової зрілості управлінського персоналу ОВ	Бали (макс. 100)	89,6
25	Іміджева оцінка ОВ з боку девелопера	Бали (макс. 100)	95
26	Рівень зовнішніх загроз ритмічності та якості виконання робіт	низький, середній, значний, критичний	низький
27	оцінка ступеня рівномірності графіку виконання робіт - щодо наближеності інтенсивності до нормального розподілу щодо близькості	нормальний розподіл, незначно віддалений від нормального, суттєво нерівномірний, критично нерівномірний	незначно віддалений



Етапи алгоритму оцінювання технічного стану будівель та інженерних споруд в складі девелоперського проєкту відновлення



Сценарно-імітаційне коригування параметрів виконання робіт в девелоперському проєкті оцінки технічного стану і відновлення будівель та інженерних споруд

Джерело: розроблено автором.

Результуюча бально-семантична оцінка стану інженерної споруди за підсумками використання комплексу програм.

№ с тану	Бальна оцінка стану	Семантична оцінка стану	Опис стану та рекомендовані заходи.
1.	[0-11[	Критично- незадовільний	Опис: присутні великі структурні ушкодження, ризик колапсу; втрачено несучу здатність локально/загалом. Дії: негайне обмеження чи закриття руху, аварійні заходи, детальне інструментальне обстеження, терміновий проект рятувальних заходів
2.	[11-31[	Незадовільний	Значні дефекти, прогресуючі руйнування; експлуатація обмежена. Дії: обмеження навантажень, пріоритетні ремонти, введення моніторингу в підвищеному режимі.
3.	[31-55[	Задовільний, з локальними незадовільними елементами	Опис: загальна придатність з локальними проблемами (корозія, тріщини, пошкодження руслового захисту). Дії: плановий ремонт локальних зон, підвищена інспекційна частота, застосування прогнозування дефектів.
4.	[55-76[	Добрий (експлуатаційно придатний)	конструкція в цілому працездатна; незначні дефекти, не впливають на несучу здатність. Дії: регламентні роботи за графіком, підтримуючий моніторинг, документування в BIM.
5.	[76-98[	Високий стан надійності	Відмінний стан несучих елементів, незначні косметичні ушкодження; запас міцності високий. Дії: рідкісні інспекції, превентивне обслуговування, інтеграція результатів у довгострокове планування
6.	[98-100]	Абсолютно надійна експлуатація.	майже ідеальний стан, усі показники в межах нормативів, високий запас ресурсу. Дії: планова профілактика, рутинний моніторинг, архівація стану в цифровому паспорті (BIM).

Джерело: розроблено автором

Програмний код, що використовувався в роботі

```

from keras.models import Sequential
from keras.layers import Dense
import matplotlib.pyplot as plt
import tensorflow as tf
import pandas as pd
import numpy as np
from keras.models import model_from_json
#from keras.layers import LSTM
from keras import metrics

physical_devices = tf.config.list_physical_devices('GPU')
tf.config.set_visible_devices(physical_devices[0], 'GPU')

column_names = ['x1', 'x2', 'x3', 'x4', 'x5', 'x6', 'x7', 'x8', 'x9', 'x10', 'x11', 'x12', 'x13', 'x14', 'x15', 'x16', 'y']
dataset = pd.read_csv('Last_Year_Bridges_small.csv', names=column_names, sep=';')

train_dataset = dataset.sample(frac=0.8, random_state=0)
test_dataset = dataset.drop(train_dataset.index)

y_train = train_dataset[['y']]
x_train = train_dataset[['x1', 'x2', 'x3', 'x4', 'x5', 'x6', 'x7', 'x8', 'x9', 'x10', 'x11', 'x12', 'x13', 'x14', 'x15', 'x16']]

y_test = test_dataset[['y']]
x_test = test_dataset[['x1', 'x2', 'x3', 'x4', 'x5', 'x6', 'x7', 'x8', 'x9', 'x10', 'x11', 'x12', 'x13', 'x14', 'x15', 'x16']]

#pandas to numpy
y_test = y_test.values

mean = x_train.mean(axis=0)
std = x_train.std(axis=0)
x_train -= mean
x_train /= std
x_test -= mean
x_test /= std

model = Sequential()
model.add(Dense(128, activation='relu', input_shape=(x_train.shape[1],)))
model.add(Dense(64, activation='relu'))
model.add(Dense(32, activation='relu'))
model.add(Dense(1))
model.compile(optimizer='adam', loss='mean_squared_error', metrics=['mean_absolute_error'])

print(model.summary())

fit_results = model.fit(x_train, y_train, epochs=100, batch_size=4, verbose=2, validation_split=0.2)

mean_squared_error, mean_absolute_percentage_error = model.evaluate(x_test, y_test, verbose=0)
pred = model.predict(x_test)

```

```

err = np.round(np.mean(abs(pred - y_test)),3)
print('The mean deviation between prediction and target', err)
mape = np.round(np.mean(abs(pred - y_test)) / np.mean(abs(y_test)),3) * 100
print('MAPE, %', mape)

#mape2 = tf.keras.metrics.MeanAbsolutePercentageError(
# name="mean_absolute_percentage_error", dtype=None
#)

#print('mape2', mape2)

for i in range(len(pred)):
    # print("The predicted values:", np.round(abs(pred[i]),3), "The target values:", y_test[i], "The difference",
    np.round(abs(pred[i]-y_test[i]),3), 'MAPE, %', np.round((abs(pred[i]-y_test[i]) / abs(y_test[i])),3) * 100)

mean_y_test = np.mean(y_test)
for i in range(len(pred)):
    r_2 = 1 - ((y_test[i] - pred[i])**2) / ((y_test[i] - mean_y_test)**2)
    print("Determination Coefficient R^2:", r_2)

r_2_all = 1 - sum(((y_test - pred)**2)) / sum(((y_test - mean_y_test)**2))
print("All Determination Coefficient R^2:", r_2_all)
print('MAPE, %', mape)
print('accuracy', accuracy)
print('mean_absolute_percentage_error', mean_absolute_percentage_error * 100)

print('Mean Absolute Error:', np.mean(abs(metrics.mean_absolute_error(y_test, pred))))
print('Mean Squared Error:', np.mean(abs(metrics.mean_squared_error(y_test, pred))))
print('Mean_absolute_percentage_error:', np.mean(abs(metrics.mean_absolute_percentage_error(y_test, pred))))
print('Root Mean Squared Error:', np.mean(abs(np.sqrt(metrics.mean_squared_error(y_test, pred)))))

fig = plt.figure(figsize=(30,20))
ax = plt.axes()
#plt.title('The losses on the training and validation sets', size=60, color='black', weight='bold', family='calibri')
plt.plot(fit_results.history['loss'],label='Навчання', color='olive', linewidth=6, linestyle = '--')
plt.plot(fit_results.history['val_loss'],label='Валідація', color='blue', linewidth=6)
plt.ylim(0, 0.01)
plt.legend(loc='best', labelcolor='black', facecolor = 'white', fontsize=35)
plt.xlabel('Кількість епох', fontsize = 45, color = 'black')
plt.ylabel('Середньоквадратична похибка', fontsize = 45, color = 'black')
plt.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=30, labelcolor = 'black')
plt.grid(axis = 'both', color = 'grey', linewidth = 2, linestyle = '--')
ax.set_facecolor('white')
plt.show()
fig.savefig('losses train validation.png', dpi=400)

fig = plt.figure(figsize=(30,20))
ax = plt.axes()
#plt.title('MSLE on the training and validation sets', size=60, color='black', weight='bold', family='calibri')
plt.plot(fit_results.history['mean_absolute_error'],label='Навчання', color='olive', linewidth=6, linestyle = '--')
plt.plot(fit_results.history['val_mean_absolute_error'],label='Валідація', color='blue', linewidth=6)
plt.legend(loc='best', labelcolor='black', facecolor = 'white', fontsize=35)

```

```

plt.xlabel('Кількість епох', fontsize = 45, color = 'black')
plt.ylabel('Середня абсолютна похибка', fontsize = 45, color = 'black')
plt.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=30, labelcolor = 'black')
plt.grid(axis = 'both', color = 'grey', linewidth = 2, linestyle = '--')
ax.set_facecolor('white')
plt.show()
fig.savefig('mean_absolute_error train validation.png', dpi=400)

fig = plt.figure(figsize=(30,20))
#plt.title('Scatter plot of predict and target values', size=60, color='black', weight='bold', family='calibri')
a = plt.axes(aspect='equal')
plt.scatter(y_test, pred, color='forestgreen', marker='o', s=3000)
plt.xlabel('Цільове значення', fontsize = 45, color = 'black')
plt.ylabel('Прогнозне значення', fontsize = 45, color = 'black')
lims = [0, 10.0]
plt.xlim(lims)
plt.ylim(lims)
_ = plt.plot(lims, lims, color='mediumblue', linewidth=8)
plt.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=45, labelcolor = 'black')
plt.grid(axis = 'both', color = 'grey', linewidth = 2, linestyle = '--')
a.set_facecolor('white')
plt.show()
fig.savefig('Scatter plot.png', dpi=400)

error = np.around(abs(pred - y_test),3)
fig = plt.figure(figsize=(30,20))
plt.hist(error, bins = 20, color='teal')
plt.xlabel("Значення помилок", fontsize = 45, color = 'black')
plt.ylabel("Кількість помилок", fontsize = 45, color = 'black')
plt.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=30, labelcolor = 'black')
plt.grid(axis = 'both', color = 'grey', linewidth = 2, linestyle = '--')
ax.set_facecolor('white')
plt.show()
fig.savefig('histogram plot.png', dpi=400)

errors_df = pd.DataFrame(x_test,
columns=['x1','x2','x3','x4','x5','x6','x7','x8','x9','x10','x11','x12','x13','x14','x15','x16'])
errors_df['error'] = np.abs(pred - y_test)
plt.figure(figsize=(20, 10))
errors_df.boxplot(column='error', by=['x1','x2','x3','x4','x5','x6','x7','x8','x9','x10','x11','x12','x13','x14','x15','x16'])
plt.title('Похибки по кожній ознаці', fontsize=16)
plt.xlabel('Ознаки', fontsize=12)
plt.ylabel('Абсолютна похибка', fontsize=12)
plt.xticks(rotation=45)
plt.tight_layout()
plt.show()
# fig.savefig('boxplot plot.png', dpi=400)

import seaborn as sns
plt.figure(figsize=(40, 30))
ax = plt.axes()
correlation_matrix = errors_df.corr()
sns.set(font_scale=3.4)

```

```

sns.heatmap(correlation_matrix, annot=True, cmap='coolwarm', linewidths=2.5)
plt.title('Кореляційна матриця похибок', fontsize=46)
plt.tight_layout()
# ax.set_facecolor('white')
plt.show()
fig.savefig('matrix plot.png', dpi=400)

scores = model.evaluate(x_train, y_train, verbose=0)
print("%s: %.2f%%" % (model.metrics_names[1], scores[1]*100))

# save model
model.save_weights('Last_Year_Bridges_small.h5')
# serialize model to JSON
model_json = model.to_json()
with open("Last_Year_Bridges_small.json", "w") as json_file:
    json_file.write(model_json)
print("Saved model to disk")

# load json and create model
json_file = open('Last_Year_Bridges_small.json', 'r')
loaded_model_json = json_file.read()
json_file.close()
loaded_model = model_from_json(loaded_model_json)

# load weights into new model
loaded_model.load_weights('Last_Year_Bridges_small.h5')
print("Loaded model from disk")

# evaluate loaded model on test data
loaded_model.compile(loss='mean_squared_error', optimizer='adam', metrics=['mean_absolute_error'])
score = loaded_model.evaluate(x_train, y_train, verbose=0)
print("%s: %.2f%%" % (loaded_model.metrics_names[1], score[1]*100))

n_dataset = pd.read_csv('predict_Last_Year_Bridges_small.csv', sep=';')

mean = pd.read_csv('mean.csv')
std = pd.read_csv('std.csv')

# Стандартизувати
n_dataset = (n_dataset - mean) / std

print(n_dataset)
pred_n = loaded_model.predict(n_dataset)
print(pred_n)

```