

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

СТЕПАНЮК РОМАН БОРИСОВИЧ

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

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

05.23.08 – технологія та організація промислового та цивільного
будівництва

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ-2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі менеджменту в будівництві Київського національного університету будівництва і архітектури

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
Поколенко Вадим Олегович,
Київський національний університет
будівництва і архітектури, МОН України,
професор кафедри менеджменту в будівництві

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Арутюнян Ірина Андріївна, Запорізький
національний університет, Інженерний навчально-
науковий інститут ім. Ю. М. Потебні, завідувач
кафедри промислового та цивільного будівництва

доктор технічних наук, професор,
Трач Роман Володимирович, Національний
університет водного господарства та
природокористування (м.Рівне),
професор кафедри промислового, цивільного
будівництва та інженерних споруд

Захист відбудеться **10 листопада 2025 року о 13-00** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.03 у Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, пр. Повітряних Сил, 31, а. 204

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, пр. Повітряних Сил, 31.

Автореферат розіслано «09» жовтня 2025 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.056.03
к.т.н., доцент



М.В. Клис

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 унеможливорює 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 оцінюванні 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 ІІІ, 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 входних 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 поточних 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 в 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 234 найменувань, додатки. Обсяг основного тексту дисертації складає 228 сторінок, включаючи 52 рисунки та 12 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі розкрито актуальність і значущість теми дисертації, визначено її мету та основні завдання, представлено ключові положення, наукову й практичну цінність отриманих результатів. Окремо зазначено особистий внесок автора.

У першому розділі роботи *«Теоретичні основи розвитку технології та організації в проєктах відновлення будівель та споруд в умовах цифрової трансформації»* опрацьовано концептуально-теоретичні підходи до оцінки технічного стану будівель та споруд, в рамках проєктів відновлення (рис.1), із переважним акцентом на мостові споруди як об'єкти критичної інфраструктури.

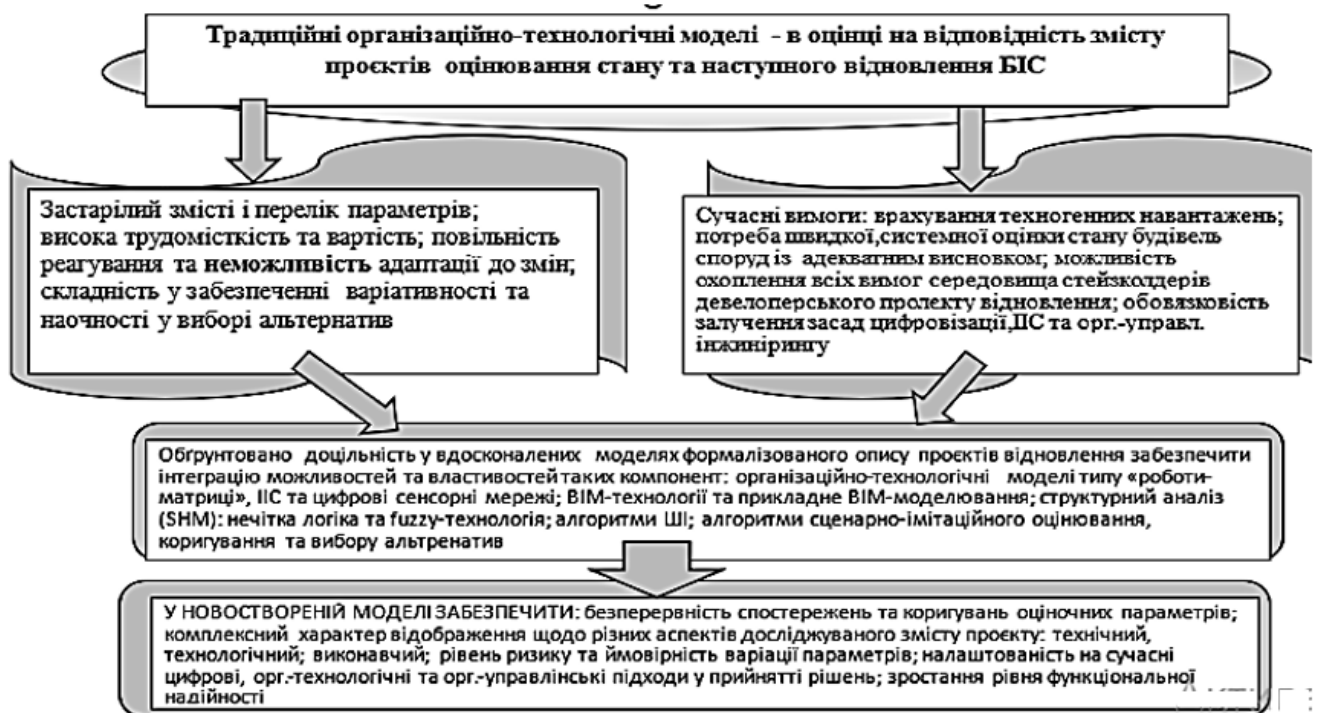


Рис. 1. Схема трансформації організаційно-технологічних моделей в умовах девелоперських проєктів відновлення для забезпечення адаптивного оцінювання технічного стану будівель і споруд. Джерело: розроблено автором.

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 (рис.2.).

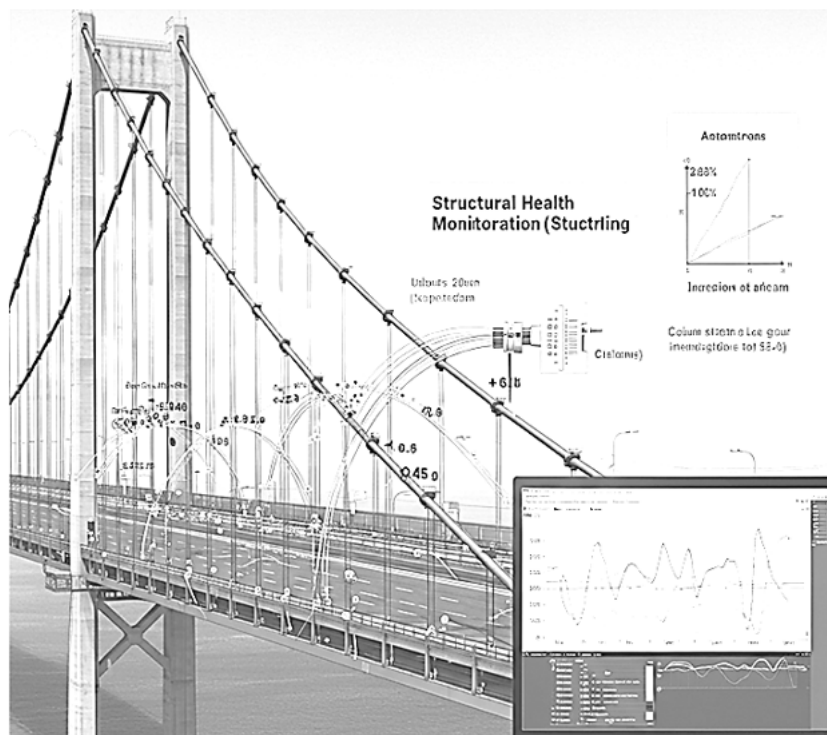


Рис.2. Візуалізація технології оцінювання стану мостових конструкцій із застосуванням ІС. Джерело: розроблено автором.

ІС використовуються для формування інформаційних моделей об'єкта відновлення її на основі ВІМ-технологій, проведення варіантного аналізу проектних рішень, прогнозування поведінки конструкцій після реконструкції та автоматизації перевірки нормативної відповідності. Це сприяє оптимізації процесу узгодження документації, скороченню термінів виконання робіт і підвищенню якості проектної підготовки.

У другому розділ роботи «Загально-методичне підґрунтя організаційно-технологічного забезпечення процесів формалізації циклу проєктів відновлення у діджитал-адаптованому середовищі організації будівництва» здійснено пошук загально-методичного підґрунтя (рис.3) 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 (табл.1).

У відповідності із змістом досліджень даного розділу обґрунтовано, що технічний стан мосту в цілому - після оцінки умов експлуатації групових елементів доцільно оцінювати наступним чином (1):

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

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.

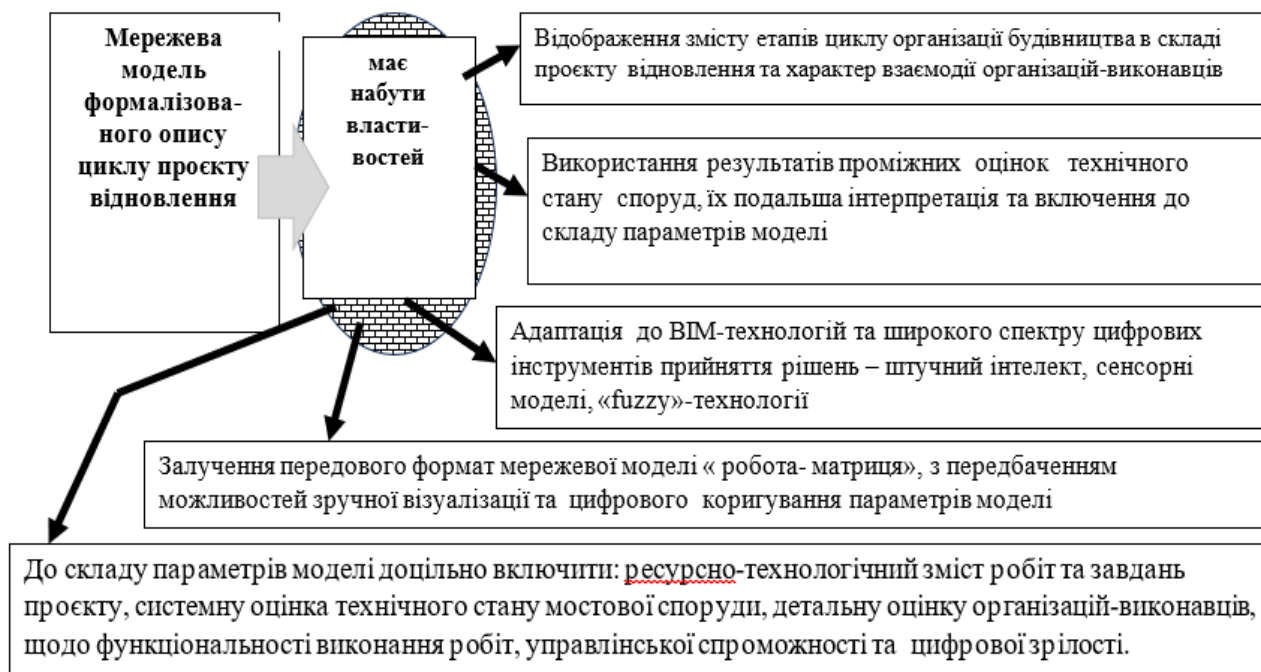


Рис. 3. Схема пошуку формату організаційно-технологічної моделі формалізованого опису проєкту відновлення

За підсумками досліджень, відображених в другому розділі дисертації, було сформовано загально-методичну основу організаційно-технологічного забезпечення процесів формалізації та опису оцінки технічного стану будівель і споруд у діджитал-адаптованому середовищі організації будівництва. В якості ключових компонент методичного базису обрано: інтеграцію BIM-моделювання, інструментів штучного інтелекту та цифрових систем підтримки прийняття рішень, що дозволяє забезпечити комплексне оцінювання і прогнозування стану об'єктів, зокрема критичної інфраструктури.

Удосконалено підхід до класифікації експлуатаційних станів елементів будівель і споруд, який включає п'ять рівнів – від справного до непрацездатного, що є основою для підвищення надійності та безпеки експлуатації інженерних об'єктів.

Таблиця 1

Класифікація експлуатаційних станів елементів будівель і споруд (*)

Експлуатаційний стан		Узагальнена характеристика стану
№ стану	назва	
Стан 1	Справний	Елемент відповідає всім вимогам проєкту та чинних норм експлуатації

Стан 2	Обмежено справний	Елемент частково не відповідає вимогам проекту, проте не порушуються вимоги першої і другої груп граничних станів
Продовження табл. 1		
Стан 3	Працездатний	Елемент частково не відповідає вимогам проекту, проте не порушуються вимоги першої групи граничних станів. Можливе часткове порушення вимог другої групи граничних станів, якщо це не обмежує нормального функціонування.
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

*Джерело: розроблено автором.

В третьому розділі дисертаційної роботи «Аналітичний інструментарій формалізованого організаційно-технологічного моделювання проекту відновлення споруд у цифровому середовищі будівельного девелопменту, з використанням ІС» подано провідний результат роботи: цифрова, організаційно-технологічна модель опису проекту відновлення мостових споруд. Модель являє собою організаційно-технологічну модель у вигляді цифрового багатогранника (рис.4).



Рис. 4. Організаційно-технологічна модель формалізованого опису проекту 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.2).

Таблиця 2

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.
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 BIM-моделі, планування термінів та ресурсних потреб; складання плану виконання робіт.
5.	Регламентація.	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.5. 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	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	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 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 проекту	%	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

Рис. 5. Матриця параметрів по окремій стадії проекту – компоненти «багатогранника» мережевої моделі. Джерело: розроблено автором.

В четвертому розділі «Імплементация програмного інструментарію для оцінки стану будівель та інженерних споруд» подано опис компонентів комплексу прикладних програм (рис. 6,7). Модулі комплексу програм реалізують 10-стадійний алгоритм.

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.

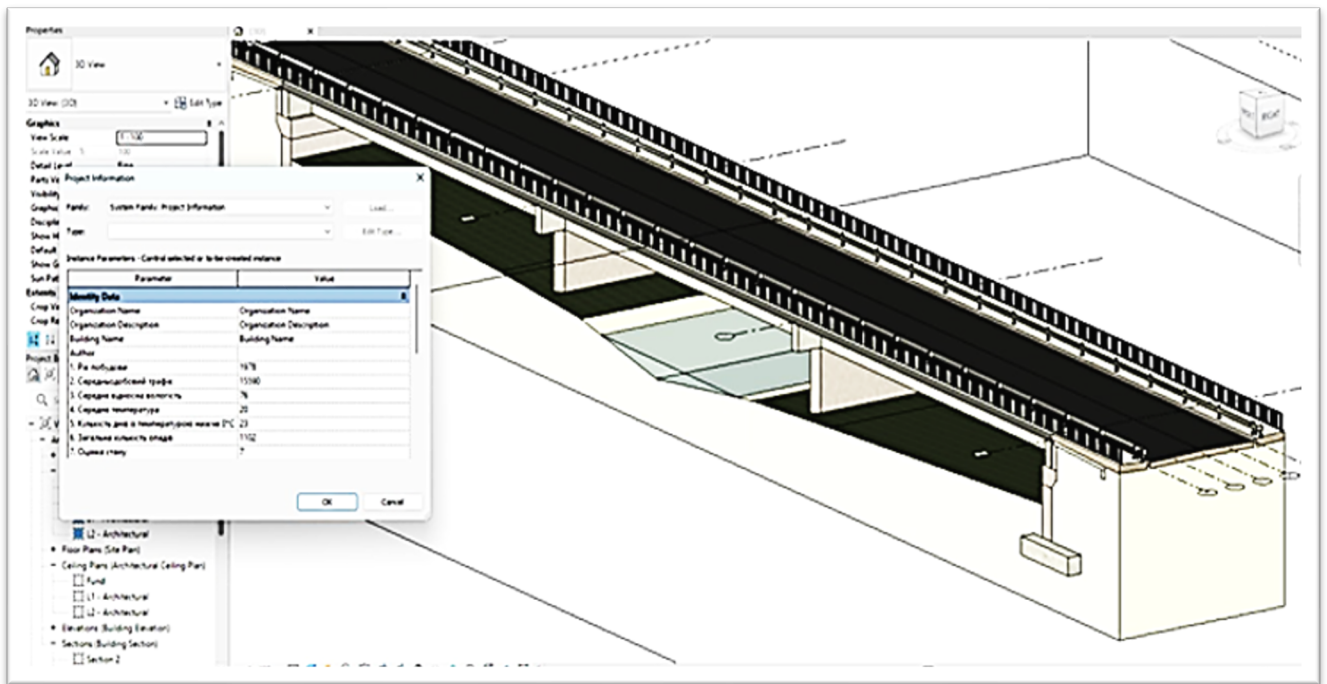


Рис.6. Підготовка комплексу програм до відображення 3D-моделі мостової споруди рамках проєкту відновлення. Джерело: розроблено автором.

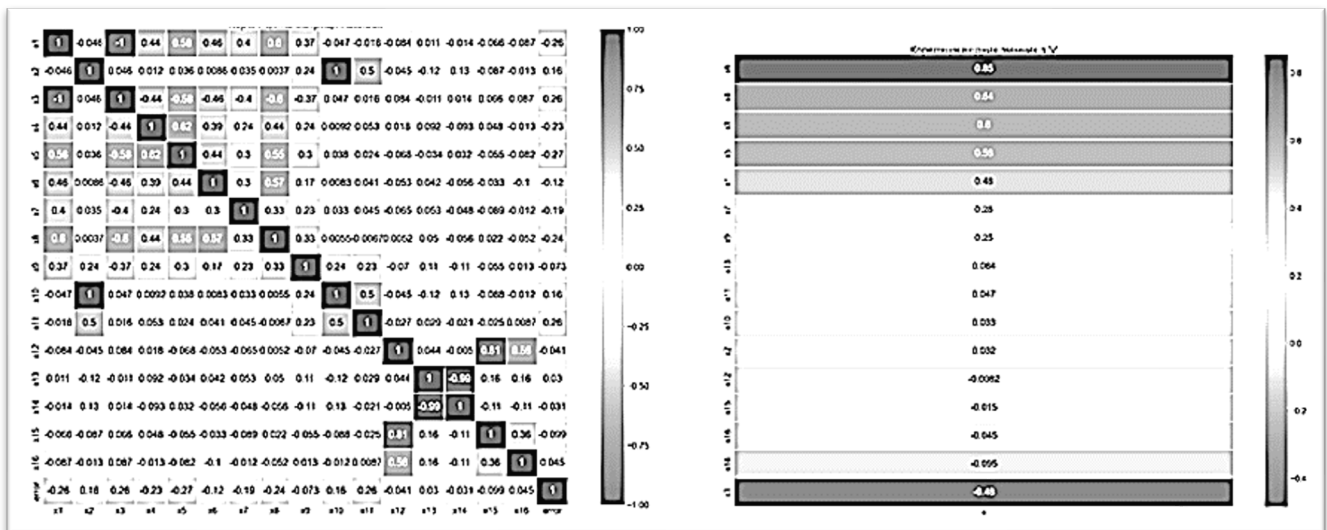


Рис.7. Модуль вияву похибок прогнозування в складі комплексу програм. Зліва - «кореляційна матриця похибок»; справа – «теплова матриця кореляції між вхідними змінними (x_1) та вихідною змінною (y)». Джерело: розроблено автором.

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.

Комплекс програм 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). Запропонований формат підсумкової результатуючої оцінки стану мостової споруди у 6 станів, з одночасним подання семантичної (лінгвістичної) категорії та інтервалу в балах 0–100.

Підвищення точності діагностики в рамках інструментарію оцінено так (2):

$$\Delta Z_{\text{діаг}}^{\%} = [(Z_{\text{ші}} - Z_{\text{бв}}) / Z_{\text{бв}}] * 100\%, \quad (2)$$

де $Z_{\text{ші}}$ - точність обстежень, досягнута за рахунок залучення комплексу програм;

$Z_{\text{бв}}$ - базова альтернатива точності обстеження та виявлення пошкоджень, бали;

$\Delta Z_{\text{діаг}}^{\%}$ – відносний приріст точності технічного обстеження, %

Функціональну доцільність застосування КПП 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.

Таблиця 4

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 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 за підсумками використання комплексу програм.

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 підвищуючи 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, мережевих 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 ШІ. 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, 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. Його впровадження в девелоперські проекти дозволяє створити замкнений цикл цифрового управління технічним станом споруд.

3. Провідним науковим результатом дослідження є мережева організаційно-технологічна модель формалізованого опису девелоперського проекту 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 проекту: 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 проекту 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 проекту. 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 проектом 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 мережових 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 байєсівська 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 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.- 48(2)_2021.-С.98-105. Режим доступу: DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51\(2\).98-105](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(2).98-105). *Особистий внесок*: відображено основні кроки оновлення засад формалізованого супроводу девелоперських будівельних проєктів.

2. **Р. Б. Степанюк.** 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. **Р. Б. Степанюк, В. О. Поколенко, Д.Г. Ратніков.** Інтеграція інтелектуальних інформаційних систем в технологію процесів реконструкції та відновлення експлуатаційної придатності інженерних споруд 51(2)_2023. Режим доступу: 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 ІС.

4. Хоменко О., Петренко Г., **Степанюк Р.** (2023). Цільові пріоритети та формалізовані індикатори трансформації операційних систем стейкхолдерів будівництва. *Управління розвитком складних систем*, (56), 173-180. DOI: 10.32347/2412-9933.2023.56.173-180.-Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urss_2023_56_24. *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.** (2024). Інтеграція прикладних модулів ІРД до складу організаційно-технологічних інструментів управління будівництвом. *Містобудування та територіальне планування*, (86), 261-271. DOI: 10.32347/2076-815x.2024.86.261-271: Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2024_86_22 *Особистий внесок*: запропоновано модель взаємодії ІРД-компонентів з цифровими платформами управління проєктами 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.** (2024). Науково-прикладні засади організаційно-технологічного моделювання девелоперських проєктів у форматі стратегічних інновацій. *Містобудування та територіальне планування*, (87), 193-205. DOI: 10.32347/2076-815x.2024.87.193-205 - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2024_87_18 *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. (2024). Формування аналітичних компонент інтегрованої реалізації будівельного проєкту як цифрової екосистеми. *Просторовий розвиток*, (10), 287-300. DOI: 10.32347/2786-7269.2024.10.287-300 - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/spdev_2024_10_25 *Особистий внесок*: обґрунтовано та запропоновано аналітичну модель інтеграції функціональних

компонент цифрової екосистеми у структуру реалізації будівельного проєкту; 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. (2024). Цифрові моделі організації будівництва на ґрунті інтеграційного підходу та SMART-управління. *Управління розвитком складних систем*, (60), 165-173. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.165-173 - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urss_2024_60_21 *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. (2024). Концептуально-аналітичні особливості забезпечення бізнес-стійкості підприємств у мультипроєктному середовищі будівельного девелопменту. *Будівельне виробництво*, (77), 58-66. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.77> Режим доступу: <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.Б.**, Антипенко Є.Ю., Валінкевич Н.В. (2025). Структурно-динамічна трансформація операційної системи підприємств будівельного девелопменту: аналітико-прикладні аспекти. *Просторовий розвиток*, (11), 510-521. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.11.510-521 Режим доступу: <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/29/2025/SD2511.pdf> *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.

11. **Степанюк Р.** (2024). BIM 4D–7D як основа інтегрованого управління життєвим циклом об'єктів у промисловому та цивільному будівництві. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, 3(53), 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) Режим доступу: <http://ways.knuba.edu.ua/article/view/329624>

Статті в наукових періодичних виданнях держав ЄС:

12. **Stepaniuk Roman** (2025). Digital transformation of monitoring and assessment of building structures and facilities using intelligent SHM solutions. *Colloquium-journal / «Technical sciences»*. №52 (245), pp. 40-45. (Польща). doi.org/10.5281/zenodo.15720737-Режим доступу: [//colloquium-journal.org/en/journal/colloquium-journal-53-246-2025-246-1.pdf/](https://colloquium-journal.org/en/journal/colloquium-journal-53-246-2025-246-1.pdf/)

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 реалізація проєктів в будівництві*. К.: ПП Сердюк В.Л., 2024. - С.164-174. Режим доступу: [//repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/146a567b-c79a-4b18-81b4-be3491d0a4c3/content](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. Режим доступу: 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. С. 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. С. 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 научния прогресс*», 2022: София: Бял ГРАД-БГ. С.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.

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.

Дисертаційне дослідження спрямоване на розробку концептуально-методичних основ та інструментарію для формалізованого оцінювання технічного стану будівель та інженерних споруд у процесі їх експлуатації, реконструкції та відновлення. Запропонований підхід інтегрує цифрові платформи, BIM-моделювання, сенсорну аналітику та інструменти штучного інтелекту для створення адаптивних систем діагностики та прогнозування стану конструкцій.

Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні науково-методичної основи та аналітичного інструментарію організаційно-технологічного моделювання циклу девелоперських проєктів відновлення, де оцінка технічного стану будівель і споруд в складі проєкту реалізується на ґрунті інтелектуальних інформаційних систем (ІС). Це забезпечує системний і комплексний підхід до формалізації змісту проєктів відновлення. Провідним науковим результатом є розробка мережевої організаційно-технологічної моделі девелоперського проєкту відновлення мостів у вигляді «цифрового багатогранника», де кожна грань відповідає цифровій моделі типу «робота-матриця». Параметри моделі відображають виконання робіт та особливості девелоперського середовища, охоплюючи всі стадії проєкту – від формування адміністративного середовища, підготовчих заходів і оцінки технічного стану до моделювання, відбору виконавців, складання кошторисів і будівельно-монтажних робіт із завершальним контролем. Модель виходить за межі традиційного технічного підходу, інтегруючи оцінку надійності виконавців, їх управлінських компетенцій, цифрової зрілості та готовності до виконання завдань. Враховуються внутрішні процеси та зовнішні чинники – ризики постачання, стійкість до загроз, технологічна інноваційність і ритмічність виконання робіт, що забезпечує системність і формалізацію управління у цифровому середовищі.

Розроблено та впроваджено інтегрований програмний комплекс для оцінки технічної надійності інженерних споруд і визначення потенціалу їх безпечної

експлуатації. Архітектура комплексу включає модулі, що підтримують 10-стадійну модель аналізу стану об'єктів із застосуванням складно-структурованої мережевої моделі, штучного інтелекту, Байєсівської оптимізації, сценарно-імітаційного коригування та бально-семантичного оцінювання. Архітектура комплексу забезпечує замкнутий цикл обробки даних та дозволяє своєчасно виявляти критичні відхилення у стані об'єктів та підвищувати точність прогнозування.

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».

The ABSTRACT

Stepanyuk 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 in the 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 research is aimed at developing conceptual and methodological foundations and tools for formalized assessment of the technical condition of engineering buildings during their operation, reconstruction and restoration. The proposed approach integrates digital platforms, BIM modeling, sensor analytics and artificial intelligence tools to create adaptive systems for diagnostics and forecasting the condition of structures.

The scientific novelty of the work lies in improving the scientific and methodological basis and analytical tools for organizational and technological modeling of the cycle of development restoration projects, where the assessment of the technical condition of buildings and structures within the project is implemented based on intelligent information systems (IIS). The leading scientific result is the development of a network organizational and technological model of a development project for bridge restoration in the form of a “digital polyhedron”, where each face corresponds to a digital model of the “work-matrix” type. The model parameters reflect the performance of work and the features of the development environment, covering all stages of the project - from the formation of the administrative environment, preparatory measures and assessment of the technical condition to modeling, selection of performers, preparation of estimates and construction and installation works with final control. The model goes beyond the traditional technical approach, integrating the assessment of the reliability of performers, their managerial competencies, digital maturity and readiness to perform tasks. Internal processes and external factors are considered - supply risks, resistance to threats, technological innovation and rhythm of work performance, which ensures systematicity and formalization of management in a digital environment. An integrated software package has been developed and implemented to assess the technical reliability of engineering structures and determine the potential for their safe

operation. The architecture of the complex includes modules that support a 10-stage model of object state analysis using a complex-structured network model, artificial intelligence, Bayesian optimization, scenario-simulation adjustment, and point-semantic evaluation. The architecture of the complex provides a closed data processing cycle and allows for timely detection of critical deviations in the state of objects and increased forecasting accuracy.

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".