

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-45>

УДК 004.94

**БАКУРОВА АННА**

Національний університет "Запорізька політехніка"

<https://orcid.org/0000-0001-6986-3769>

e-mail: [abaka111060@gmail.com](mailto:abaka111060@gmail.com)

**БІЛИЙ ВІТАЛІЙ**

Національний університет "Запорізька політехніка"

<https://orcid.org/0009-0008-7608-4796>

e-mail: [vitalii.bilyi.zp@gmail.com](mailto:vitalii.bilyi.zp@gmail.com)

## СЦЕНАРНИЙ РОЗРАХУНОК ВАРТОСТІ ВІДБУДОВИ ПОШКОДЖЕНОГО ОБ'ЄКТА ІНФРАСТРУКТУРИ: ПІДХІД НА ОСНОВІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

*Предметом дослідження є методи та засоби сценарного (what-if) перерахунку орієнтовної вартості відбудови пошкодженого об'єкта інфраструктури на основі цифрового двійника.*

*Мета роботи – розробка цифрового двійника пошкодженого об'єкта нерухомості, який забезпечує прогнозування орієнтовної вартості відновлення, сценарний перерахунок при зміні характеристик об'єкта та інтерпретацію результатів.*

*У статті вирішуються такі завдання: аналіз існуючих підходів до моделювання цифрових двійників та прогнозування вартості відбудови; розробка архітектури, що інтегрує систему фіксації руйнувань, мікросервіс машинного навчання та модуль сценарного перерахунку; реалізація механізму інтерпретації прогнозів; створення прототипу цифрового двійника з підтримкою сценарного (what-if) аналізу.*

*Використовуються такі методи: архітектурного проектування для побудови гібридної веб-системи; машинного навчання для автоматизованого розрахунку вартості на основі ансамблевої моделі XGBoost; інтерпретації прогнозів із застосуванням SHAP (SHapley Additive exPlanations) аналізу для оцінки внеску окремих характеристик об'єкта у кінцеву оцінку вартості.*

*Здобуто такі результати: розроблено прототип цифрового двійника, що поєднує модуль ведення цифрового профілю об'єкта, модуль сценарного розрахунку для моделювання альтернативних варіантів відбудови, ML-мікросервіс прогнозування вартості та модуль інтерпретації на основі TreeSHAP (алгоритмічної реалізації SHAP для деревоподібних моделей, зокрема XGBoost). Система забезпечує наскрізний процес від фіксації пошкоджень до обґрунтованого порівняння сценаріїв відновлення.*

*Висновки: запропонований підхід спрямований на вирішення проблеми фрагментарності існуючих рішень, де реєстрація руйнувань, прогнозування та сценарний аналіз функціонують ізольовано. Практична цінність полягає у можливості оперативно порівнювати альтернативи відбудови та підвищувати прозорість бюджетного планування. Обмеження дослідження пов'язані з невеликим обсягом навчальної вибірки та діапазоном валідованих значень вартості, що зумовлює потребу в додатковій верифікації результатів. Обмеження дослідження пов'язані з невеликим обсягом навчальної вибірки, валідацією результатів в діапазоні 20–90 млн грн та описовим характером окремих категоріальних ознак.*

**Ключові слова:** цифровий двійник; прогнозування витрат; ML; XGBoost; SHAP; мікросервіс.

**BAKUROVA ANNA, BILYI VITALII**

Zaporizhzhia Polytechnic National University

## SCENARIO-BASED RECONSTRUCTION COST CALCULATION OF A DAMAGED INFRASTRUCTURE OBJECT: A DIGITAL TWIN-BASED APPROACH

*The subject matter of the article is the methods and tools for scenario-based (what-if) recalculation of the estimated reconstruction cost of a damaged infrastructure object using a digital twin.*

*The goal of the work is to develop a digital twin of a damaged real estate object that provides forecasting of the estimated recovery cost, scenario-based recalculation when object characteristics change, and interpretation of results.*

*The following tasks were solved in the article: analysis of existing approaches to digital twin modeling and reconstruction cost forecasting; development of an architecture that integrates a destruction recording system, a machine learning microservice, and a scenario recalculation module; implementation of a prediction interpretation mechanism; creation of a digital twin prototype with support for what-if analysis.*

*The following methods are used: architectural design for building a hybrid web system; machine learning for automated cost calculation based on the XGBoost ensemble model; prediction interpretation using SHAP (SHapley Additive exPlanations) analysis to assess the contribution of individual object characteristics to the final cost estimate.*

*The following results were obtained: a digital twin prototype was developed that combines a module for maintaining a digital object profile, a scenario calculation module for modeling alternative reconstruction options, an ML microservice for cost prediction, and an interpretation module based on TreeSHAP (algorithmic implementation of SHAP for tree-based models, in particular XGBoost). The system provides an end-to-end process from damage recording to justified comparison of recovery scenarios.*

*Conclusions: the proposed approach is aimed at solving the problem of fragmentation of existing solutions, where damage registration, forecasting, and scenario analysis operate in isolation. The practical value lies in the ability to quickly compare reconstruction alternatives and increase transparency of budget planning. The limitations of the study are related to the small size of the training sample, validation of results in the range of UAH 20–90 million, and the descriptive nature of certain categorical features.*

**Keywords:** digital twin; cost forecasting; ML; XGBoost; SHAP; microservice.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Бакурова Анна, Білий Віталій

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Повномасштабна війна суттєво пошкодила житлову, соціальну та виробничу інфраструктуру України. Для прозорого планування відбудови органам влади, громадам і донорам потрібні інструменти [1], що дозволяють не лише фіксувати факти руйнувань і будувати аналітичні огляди, але й оперативне прогнозувати орієнтовну вартість відновлення на рівні кожного окремого об'єкта та перераховувати її за зміни характеристик. У попередній роботі авторів було створено інформаційно-аналітичну систему фіксації руйнувань із інтерактивною мапою, OLAP-аналітикою та модулем обліку заяв, що закриває завдання збору та оглядового аналізу даних у різних адміністративних розрізах. Проте ця система не вирішує завдання автоматизованого кошторисного прогнозування на рівні одиничного об'єкта [2].

Окрема праця авторів присвячена побудові мікросервісу машинного навчання (Python/REST), який на основі структурованих ознак об'єктів (зокрема: площа, поверховість, тип будівлі, ступінь пошкодження, регіон, тип ремонту, тощо) прогнозує очікувану вартість відновлення. Дослідження показало практичну придатність ансамблевих моделей (Random Forest, XGBoost) для таких табличних даних і досягнення похибок порядку 15–20% на доступних вибірках, що достатньо для первинного бюджетного орієнтування та виявлення підозрілих заявок [3].

Разом ці два результати логічно підводять до наступного етапу дослідження – створення цифрового двійника (Digital Twin) пошкодженого об'єкта нерухомості. Під цифровим двійником у даному контексті розуміється динамічна цифрова репрезентація конкретного об'єкта, що:

- зберігає поточний стан (паспортні дані та фотофакти з реєстру);
- має вбудований прогностичний шар (ML-мікросервіс на даних структурованих ознак об'єктів);
- підтримує сценарний перерахунок вартості в режимі реального часу при зміні однієї або кількох характеристик (наприклад, тип ремонту, обсяг робіт або площа);
- повертає результат разом із поясненням впливу окремих ознак.

Ключовою особливістю запропонованого підходу є можливість керованого перерахунку прогнозованої вартості відбудови, що безпосередньо визначає його цінність для прийняття управлінських рішень. У процесі планування відновлення зацікавлені сторони часто потребують відповідей на практично орієнтовані запитання, які можна згрупувати за типами сценаріїв. Наприклад:

1. сценарій зміни типу ремонту – як зміниться кошторис у разі виконання капітального ремонту замість повної реконструкції;
2. сценарій уточнення ступеня пошкодження – як вплине перекваліфікація пошкодження (наприклад, із «середнього» на «тяжке») на оцінку вартості;
3. сценарій коригування обсягу робіт – який ефект матиме варіювання площі відновлення на  $\pm 10\text{--}20\%$ .

Загалом сценарій може передбачати зміну будь-якої характеристики об'єкта або їх комбінації, що впливає на розрахунок вартості відновлення.

Традиційні системи обліку руйнувань та оглядові аналітичні панелі не забезпечують такого рівня аналітичної гнучкості. Натомість цифровий двійник пошкодженого об'єкта виступає інтерактивним симулятором, який забезпечує можливість перерахунку очікуваної вартості відновлення при зміні параметрів об'єкта, використовуючи ту саму модель машинного навчання, що застосовувалася для первинного прогнозу. Це забезпечує підвищення обґрунтованості управлінських рішень, прозорість бюджетного планування та створює основу для об'єктивного порівняння альтернативних сценаріїв відбудови.

З науково-практичної точки зору, ключова проблема полягає у відсутності комплексного підходу, який би поєднував дані про пошкоджені об'єкти, моделі машинного навчання та механізми сценарного прогнозування в межах єдиної інтегрованої системи – цифрового двійника. Необхідність такої інтеграції зумовлена потребою у точному, динамічному та відтворюваному інструменті, що дозволяє не лише автоматично оцінювати орієнтовну вартість відбудови, але й перераховувати її при зміні характеристик об'єкта (типу ремонту, ступеня пошкодження, площі тощо).

Цифровий двійник у цьому контексті виступає функціональною ланкою між реєстром руйнувань і прогнозною аналітикою, поєднуючи реальні дані про об'єкти з результатами моделі прогнозування для формування цілісного уявлення про їх стан і орієнтовну вартість відновлення. Така інтеграція дозволяє перейти від статичного обліку пошкоджень до динамічного моделювання, у межах якого кожен об'єкт може бути проаналізований, оновлений і переоцінений за допомогою сценарного (what-if) аналізу.

### Аналіз досліджень та публікацій

У сучасних наукових публікаціях помітно зростає інтерес до технологій цифрових двійників (Digital Twin, DT), моделювання інфраструктурних об'єктів, оцінки витрат і застосування сценарного "що-якщо" аналізу для підтримки прийняття управлінських рішень. Проблематика відновлення зруйнованої інфраструктури в Україні лише підтверджує доцільність такого підходу, оскільки потребує інструментів, здатних поєднати дані про фактичний стан об'єктів із прогнозними моделями, забезпечити обґрунтоване планування витрат та порівняння альтернативних сценаріїв відбудови. Водночас аналіз останніх досліджень вказує на певні обмеження, які суттєво знижують практичну цінність існуючих рішень у контексті відбудови.

У ряді оглядових досліджень, присвячених застосуванню технологій цифрових двійників у сфері інфраструктури [4], [5], [6], розглянуто підходи до моніторингу стану об'єктів, або діагностиці інженерних

систем поза контекстом прямої оцінки витрат. Наприклад, дослідження [4] узагальнює методики створення DT для цивільної інфраструктури, однак не включає кошторисний прогноз вартості відновлення. Робота [5] розвиває семантичну онтологію DT для інфраструктури, але не пропонує механізмів перетворення характеристик об'єкта (площа, тип ремонту, ступінь пошкодження) у вартісні сценарії. В огляді [6] основну увагу приділено транспортній інфраструктурі та управлінню її життєвим циклом, проте зазначено, що практичні приклади реалізації таких систем залишаються поодинокими навіть на рівні окремих об'єктів.

Існує також група робіт, які безпосередньо звертаються до теми витрат: у дослідженні [7] запропоновано методику оцінювання витрат на впровадження DT у промисловому контексті, але не для реконструкції пошкоджених об'єктів. Стаття [8] поєднує DT з моделями штучного інтелекту в модульному будівництві, але з акцентом на зведення нових споруд, а не на відбудову пошкоджених. У дослідженні [9] проаналізовано DT у контексті цивільної інфраструктури, але головний акцент – на структурному стані (SHM) і сенсорах, а не на грошовій оцінці чи управлінні сценаріями витрат.

Ще одна група публікацій присвячена застосуванню сценарного (what-if) аналізу в концепції цифрових двійників. У роботі [10] представлено архітектуру DT із підтримкою сценарного моделювання, однак її застосування обмежується медичною галуззю і не охоплює сферу відновлення інфраструктурних об'єктів. Дослідження [11] робить огляд DT у будівництві, охоплюючи велику кількість тематик (проективання, енергетика, FM), проте приділяє недостатню увагу до кошторисної оцінки та фінансового прогнозування. В [12] розглянуто економічні аспекти впровадження DT, проте запропонована методологія не адаптована до задач відбудови пошкодженої нерухомості. В публікації [13] проаналізовано застосування DT у міському середовищі та визначено ключові бар'єри впровадження, серед яких – відсутність інтегрованої моделі, що пов'язує фактичний стан об'єкта з його фінансовими параметрами.

Проведений аналіз наукових публікацій показав, що більшість наявних рішень зосереджується на зборі даних та візуалізації наслідків руйнувань або на моніторингу технічного стану об'єктів. Водночас майже не приділяється уваги розробці систем для прогнозування вартості відновлення пошкоджених об'єктів з підтримкою сценарного моделювання зміни їх характеристик (типу ремонту, площі, ступеня пошкодження тощо). Нестача таких інструментів обмежує здатність оперативного ухвалювати обґрунтовані фінансові рішення та контролювати бюджетний розподіл під час відбудови.

Недостатньо дослідженими залишаються також підходи до пояснення прогнозів, тобто до розуміння того, які саме характеристики об'єкта найбільше впливають на розраховану вартість відновлення. Пояснення, або ж інтерпретація, має важливе значення у підтримці управлінських рішень, оскільки дозволяє не лише отримати числову оцінку, але й зрозуміти логіку її формування. Це, у свою чергу, забезпечує можливість аргументованого порівняння сценаріїв, пріоритизації відбудови за критерієм ефективності використання коштів і пояснення різниці між оцінками для схожих об'єктів. Разом із тим, бракує методів виявлення потенційно завищених сум на ранніх етапах аналізу заявок на відбудову, що могло б суттєво підсилити механізми прозорості й контролю в розподілі ресурсів на відновлення.

З огляду на зазначене, постає науково-практична проблема – необхідність розробки інтегрованого підходу, який би поєднав систему реєстрації руйнувань, моделі машинного навчання для прогнозування вартості та сценарний модуль "що-якщо" в цифровому двійнику конкретного об'єкта нерухомості. Наявні рішення функціонують фрагментарно: системи збору даних не взаємодіють із прогнозними моделями, а інструменти машинного навчання не мають механізмів сценарного перерахунку та інтерпретації результатів. Це створює розрив між етапами фіксації, аналізу та ухвалення рішень.

#### **Формулювання цілей статті**

**Метою роботи є:** розробка цифрового двійника пошкодженого об'єкта нерухомості, який забезпечує прогнозування орієнтовної вартості відновлення, сценарний перерахунок при зміні характеристик об'єкта та інтерпретацію результатів прогнозу. Такий інструмент дозволить обґрунтовано планувати витрати, порівнювати варіанти відбудови та підвищувати прозорість розподілу фінансових ресурсів.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі завдання:

1. Проведення аналізу існуючих підходів до моделювання цифрових двійників, прогнозування вартості відбудови та сценарного аналізу змін параметрів об'єкта.
2. Розробка архітектури цифрового двійника, яка інтегрує інформаційно-аналітичну систему фіксації руйнувань, мікросервіс прогнозування на основі моделей машинного навчання та модуль сценарного перерахунку вартості.
3. Реалізація механізму інтерпретації прогнозів, що дозволяє оцінювати внесок окремих характеристик об'єкта у кінцеву вартість відновлення.
4. Створення прототипу цифрового двійника з підтримкою сценарного аналізу для тестування варіантів відновлення пошкоджених об'єктів.

#### **Виклад основного матеріалу**

*Об'єктом дослідження є процес сценарного розрахунку вартості відбудови пошкоджених об'єктів інфраструктури у межах цифрового двійника. Під сценарієм у даному контексті розуміється окрема комбінація значень характеристик об'єкта (тип ремонту, ступінь пошкодження, площа тощо), для якої виконується розрахунок орієнтовної вартості відновлення. Зміна одного або кількох параметрів формує новий сценарій, що дозволяє порівнювати альтернативні варіанти відбудови.*

Під час виконання роботи інтегровано раніше створену інформаційно-аналітичну систему реєстрації руйнувань із мікросервісом машинного навчання та модулем "що-якщо" аналізу. У результаті сформовано цифровий двійник конкретного об'єкта нерухомості, який акумулює його паспортні дані, геопросторову прив'язку й фотофакти пошкоджень та забезпечує динамічну оцінку орієнтовної вартості відновлення з можливістю керування перерахунку при зміні характеристик об'єкта. Таким чином цифровий двійник виступає інструментом підтримки прийняття рішень, поєднуючи контур фіксації даних, аналітичний контур і контур сценарного розрахунку вартості відбудови.

При дослідженні були використані такі методи:

- методи архітектурного проектування, застосовані для побудови цифрового двійника на основі гібридної архітектури веб-додатку. Підхід поєднує тришарову структуру (frontend, backend, база даних) із мікросервісною організацією модулю прогнозування вартості відбудови та інтерпретації отриманих оцінок, що забезпечує масштабованість, технологічну гнучкість і можливість незалежного розвитку компонентів цифрового двійника;

- методи машинного навчання, використані для реалізації автоматизованого розрахунку вартості відновлення в цифровому двійнику [14]. Для цього проведено навчання ансамблевих регресійних моделей (зокрема XGBoost) на структурованих табличних даних про пошкоджені об'єкти. Отримані оцінки використовуються як основа для сценарного перерахунку вартості при зміні параметрів об'єкта;

- методи фазифікації, застосовані для коректного представлення порядкових категоріальних ознак [15]. Такі змінні, як ступінь пошкодження та тип ремонту, мають внутрішню градацію, яка не враховується при стандартному one-hot кодуванні. Для збереження інформації про відносні відмінності між категоріями використано представлення цих ознак у вигляді нечітких множин із трикутними функціями належності, що дозволяє формалізувати плавні переходи між станами та підвищує точність прогнозування моделі;

- методи інтерпретації прогнозів, застосовані для обґрунтування оцінки витрат на відновлення. Використання SHAP-аналізу (SHapley Additive exPlanations) дозволяє визначати внесок окремих характеристик у підсумкову оцінку вартості та підвищує прозорість для використання прогнозів у фінансовому плануванні й контролі заявок.

Цифровий двійник реалізовано як функціональне розширення наявної інформаційно-аналітичної системи фіксації руйнувань, тому його програмне ядро побудоване у вигляді веб-додатка з гібридною архітектурою, що забезпечує гнучкість сценарного аналізу та масштабованість. Клієнтська частина виконана як SPA (Single Page Application) на основі фреймворку Vue.js [16] і надає інтерфейс для створення та оновлення цифрового профілю об'єкта, запуску розрахунку вартості відновлення і сценарного перерахунку з візуалізацією впливів ознак. Серверна частина реалізована з використанням фреймворку Laravel і виконує роль API-шлюзу: забезпечує авторизацію, маршрутизацію запитів, формування даних цифрового двійника та взаємодію з ML-мікросервісом (Python/REST) [17]. Модулі прогнозування вартості відбудови та інтерпретації отриманих оцінок винесені в окремий мікросервіс [18], який приймає параметри об'єкта, повертає розраховану вартість і структуру впливів його характеристик, що дозволяє здійснювати обґрунтоване порівняння альтернативних сценаріїв відбудови.

Структуру розробленого цифрового двійника наведено на рис. 1.

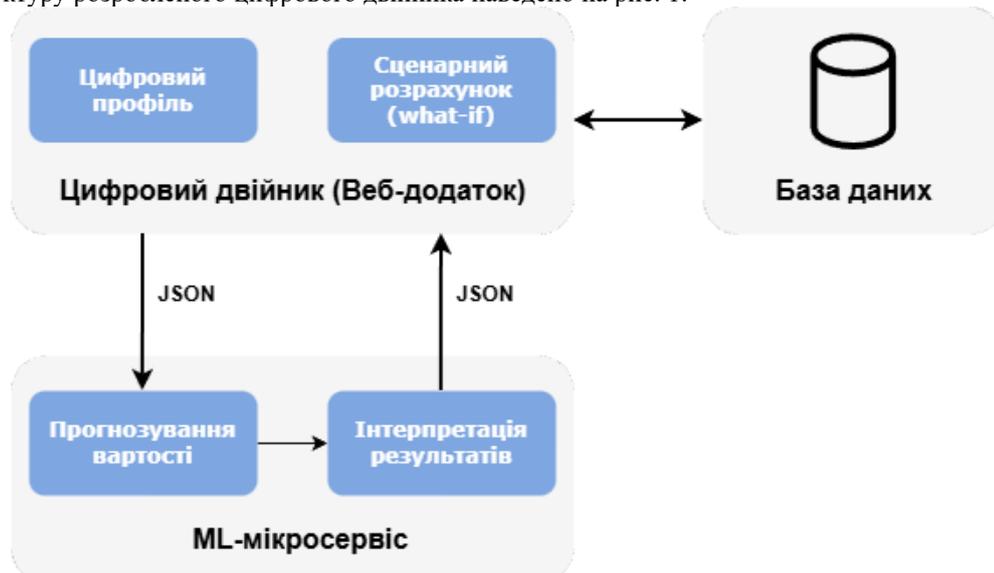


Рис. 1. Структура цифрового двійника

Функціонально цифровий двійник має модульну структуру, у якій можна виокремити кілька взаємопов'язаних блоків. Базовим є модуль ведення відомостей про пошкодження, що забезпечує формування та підтримку цифрового профілю об'єкта – структурованого набору відомостей про паспортні характеристики, ступінь пошкодження, тип запланованих відновлювальних робіт, геопросторову прив'язку та фотофакти. На

основі цього профілю працює модуль сценарного розрахунку "що-якщо" (what-if), який дозволяє змінювати характеристики об'єкта та отримувати перераховані оцінки вартості для альтернативних варіантів відбудови. Обчислення вартості забезпечує модуль машинного навчання, реалізований як окремих ML-мікросервіс, що приймає параметри профілю й повертає прогнозовану суму відновлення. Пояснення результату забезпечує модуль інтерпретації прогнозу, який визначає внесок ключових ознак у підсумкову оцінку.

Окремої уваги потребують модулі прогнозування вартості відновлення та інтерпретації отриманих оцінок, що є ключовими для роботи цифрового двійника.

Модуль прогнозування відповідає за автоматизований розрахунок орієнтовної вартості відновлення. Задача такого розрахунку належить до регресійних задач машинного навчання і полягає у побудові моделі, що за набором ознак пошкодженого об'єкта формує оцінку очікуваних витрат на його відбудову. Навчання моделі здійснюється на основі оціночної вартості  $S$  – вартості відновлення, визначеної експертами та зафіксованої у проектно-кошторисній документації системи Prozorro. Ця величина виступає цільовою змінною, яку модель навчається відтворювати, мінімізуючи похибку між прогнозованим та фактичним значенням. Результатом роботи моделі є прогнозована вартість  $V$  – числове значення орієнтовної вартості відновлення, сформоване на основі характеристик пошкодженого об'єкта.

Як основу для прогнозування у цифровому двійнику використано набір характеристик об'єкта, визначений авторами в попередній роботі [2]. Зокрема, для розрахунку застосовується вектор незалежних змінних  $x_1 - x_6$ , який відображає ключові характеристики об'єкта та контекст пошкодження, а саме:

- $x_1$  – площа об'єкта ( $m^2$ ): числова ознака, що прямо впливає на вартість матеріалів і будівельних робіт;
- $x_2$  – поверховість: числова ознака, що відображає конструктивну складність об'єкта;
- $x_3$  – тип будівлі: категоріальна ознака, що характеризує функціональне призначення об'єкта (наприклад, приватний будинок, багатоквартирний будинок, гуртожиток тощо);
- $x_4$  – ступінь пошкодження: категоріальна ознака, що задається рівнями "легке", "середнє" або "тяжке";
- $x_5$  – географічне розташування: категоріальна ознака, яка відображає область або населений пункт, що також може впливати на вартість робіт і логістику;
- $x_6$  – тип ремонту: категоріальна ознака, що описує спосіб відновлення ("поточний ремонт", "капітальний ремонт", "повна реконструкція").

Серед наведених ознак  $x_3 - x_6$  є категоріальними, що потребує їх числового представлення для використання у моделі машинного навчання. Стандартним підходом є one-hot кодування, за якого кожна категорія перетворюється на окрему бінарну колонку (0/1). Проте для ознак  $x_4$  (ступінь пошкодження) та  $x_6$  (тип ремонту) такий підхід є неоптимальним, оскільки ці змінні мають внутрішню градацію: категорії "легке", "середнє", "тяжке" утворюють природний порядок за рівнем пошкодження, а "поточний ремонт", "капітальний ремонт", "повна реконструкція" – за обсягом відновлювальних робіт. One-hot кодування не зберігає інформацію про цей порядок і розглядає всі категорії як рівновіддалені, що може знижувати точність прогнозування.

Для коректного представлення порядкових ознак у роботі застосовано методи фазифікації [15], а саме представлення категорій у вигляді нечітких множин із трикутними функціями належності. Кожній категорії присвоюється числова позиція  $p$  на нормованій шкалі [0; 1], що відображає її місце у градації. На основі цієї позиції будується трикутна функція належності  $\mu(x; a, b, c)$ , яка визначає ступінь належності значення  $x$  до відповідної категорії. Функція задається трьома параметрами:  $a$  – ліва межа ( $\mu = 0$ ),  $b$  – вершина ( $\mu = 1$ ),  $c$  – права межа ( $\mu = 0$ ):

$$\mu(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ або } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \end{cases} \quad (1)$$

Параметри  $(a, b, c)$  для кожної категорії визначаються автоматично на основі позицій сусідніх категорій: вершина  $b$  відповідає позиції категорії, а межі  $a$  та  $c$  – позиціям сусідніх категорій. Для крайніх категорій відповідна межа симетрично розширюється. Параметри фазифікації для ознак  $x_4$  та  $x_6$  наведено у табл. 1.

Таблиця 1

**Параметри фазифікації порядкових ознак**

Ознака	Категорія	$p$	$a$	$b$	$c$
$x_4$	Легке	0,0	-0,5	0,0	0,5
$x_4$	Середнє	0,5	0,0	0,5	1,0
$x_4$	Тяжке	1,0	0,5	1,0	1,5
$x_6$	Поточний	0,0	-0,5	0,0	0,5
$x_6$	Капітальний	0,5	0,0	0,5	1,0
$x_6$	Повна реконструкція	1,0	0,5	1,0	1,5

У результаті кожне значення порядкової ознаки перетворюється на вектор ступенів належності до всіх категорій. Наприклад, для ознаки  $x_4$  категорія "Середнє" ( $p = 0,5$ ) дає вектор [0; 1; 0], що означає повну належність до класу "Середнє" та нульову – до класів "Легке" і "Тяжке". Такий підхід зберігає градаційну структуру ознаки та забезпечує коректну інтерполяцію між категоріями при навчанні моделі.

Для номінальних ознак  $x_3$  (тип будівлі) та  $x_5$  (географічне розташування), які не мають природного порядку, застосовується стандартне one-hot кодування.

Після попередньої обробки всі ознаки набувають числового представлення, що дозволяє побудувати регресійну модель для прогнозування вартості відновлення. Таким чином, модель може бути представлена у вигляді функції:

$$V = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) + \varepsilon, \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  – випадкова похибка моделі.

Відповідно до цього, модуль прогнозування автоматично формує оцінку  $V$  за характеристиками об'єкта. Для цього модуль приймає параметри  $x_1$ – $x_6$  з цифрового профілю об'єкта, виконує їх попередню обробку (зокрема кодування категоріальних ознак) і формує оцінку вартості на основі навченої ансамблевої моделі (XGBoost). Результат повертається у стандартизованому форматі та зберігається в цифровому двійнику як базовий розрахунок, який надалі використовується сценарним модулем "що-якщо" для повторних перерахунків при зміні  $x_1$ – $x_6$ . Винесення розрахунків в автономний мікросервіс забезпечує технологічну незалежність моделі від основного веб-додатка, спрощує її оновлення або перенавчання та дозволяє масштабувати виконання розрахунків без впливу на інші компоненти цифрового двійника.

Модуль інтерпретації прогнозу, у свою чергу, призначений для пояснення отриманих оцінок вартості відбудови. Його функція полягає у тому, щоб разом із числовим результатом  $V$  показати, які саме характеристики об'єкта найбільше вплинули на сформовану оцінку. Для цього у мікросервісі реалізовано механізм пояснення на основі локальних внесків ознак із використанням підходу SHAP, що є сучасним стандартом інтерпретації моделей машинного навчання для табличних даних. Метод SHAP (SHapley Additive exPlanations) спирається на кооперативну теорію ігор, де кожна ознака розглядається як "гравець", що робить внесок у спільний результат моделі, а прогноз інтерпретується як їх сумарний "виграш". На основі цього обчислюються значення Шеплі, які відображають середній маржинальний внесок кожної ознаки у зміну прогнозу відносно базового рівня та дозволяють кількісно оцінити вплив характеристик об'єкта на підсумкову вартість відбудови [19]. Для заданого об'єкта з вектором ознак  $x$  прогноз моделі  $f(x)$  подається у вигляді адитивної декомпозиції:

$$f(x) = \phi_0 + \sum_{i=1}^n \phi_i, \quad (3)$$

де  $\phi_0$  – базове значення (середній прогноз моделі на навчальній вибірці),  $\phi_i$  – значення Шеплі для  $i$ -тої ознаки (локальний внесок  $i$ -тої ознаки у відхилення прогнозу  $V$  конкретного об'єкта від базового рівня  $\phi_0$ ),  $n$  – загальна кількість ознак з урахуванням кодування категоріальних змінних  $x_3$ – $x_6$ .

Значення Шеплі  $\phi_i$  для  $i$ -тої ознаки визначається як середній маржинальний внесок цієї ознаки по всіх можливих підмножинах інших ознак:

$$\phi_i = \sum_{T \subseteq N \setminus i} \frac{|T|!(n-|T|-1)!}{n!} (f(T \cup i) - f(T)), \quad (4)$$

де  $N$  – множина всіх ознак після кодування,  $T$  – підмножина ознак, що не містить  $i$ ,  $f(T \cup i)$  – прогноз моделі з урахуванням ознак підмножини  $T$  та ознаки  $i$ ,  $f(T)$  – прогноз моделі лише з ознаками підмножини  $T$ , а  $f(T \cup i) - f(T)$  – маржинальний внесок ознаки  $i$  при додаванні її до підмножини  $T$ .

Така формула гарантує три ключові властивості пояснення:

- локальна точність (сума базового значення  $\phi_0$  та внесків  $\phi_i$  дорівнює прогнозу  $V$ ),
- симетричність (рівнозначні ознаки мають рівні внески),
- узгодженість/монотонність (якщо ознака стає важливішою в моделі, її SHAP-внесок не зменшується).

Оскільки прямиий розрахунок за формулою має експоненційну складність, у цифровому двійнику використано спеціалізований алгоритм TreeSHAP [20], оптимізований для ансамблевих дерев (зокрема XGBoost). TreeSHAP обчислює  $\phi_i$  за поліноміальний час, використовуючи структуру дерев і розподіл шляхів у них, що робить метод придатним для онлайн-пояснень у веб-системі.

На практиці в цифровому двійнику використовується локальна інтерпретація SHAP, яка формується для кожного окремого прогнозу або сценарію. Система повертає вектор внесків  $\phi_i$ , який показує, як кожна характеристика  $x_1$ – $x_6$  збільшує або зменшує прогнозовану вартість  $V$ . Це дозволяє відповісти на питання, чому саме для даного об'єкта отримано таку оцінку, а також наочно порівнювати альтернативні сценарії відбудови.

Окремо (на етапі навчання) може бути сформована глобальна інтерпретація ознак, яка описує вплив факторів у середньому по вибірці й використовується для аналізу моделі та її вдосконалення, але не є обов'язковою частиною сценарного розрахунку в цифровому двійнику. Така глобальна інтерпретація формується шляхом усереднення абсолютних значень внесків  $|\phi_i|$  по всій вибірці. Це дозволяє отримати ранжування важливості ознак і визначити, які характеристики найсильніше впливають на вартість відновлення загалом.

З огляду на те, що частина ознак є категоріальними і подається у вигляді one-hot кодування, у двійнику застосовано агрегацію SHAP-внесків за групами ознак. Наприклад, усі one-hot колонки, пов'язані з ознакою "тип ремонту", підсумовуються в одну групу. Після цього для кожної групи ознак  $g$  формується абсолютний локальний внесок групи ознак у прогнозовану вартість відновлення  $V$  для конкретного об'єкта (або сценарію):

$$C_g = \sum_{i \in g} \phi_i, \quad (5)$$

де  $g$  – група ознак (наприклад, усі one-hot колонки для однієї категоріальної змінної).

Для наочного представлення внесків в інтерфейсі цифрового двійника розраховується також відносна частка впливу кожної групи, що слугує основою для побудови кругової діаграми:

$$P_g = \frac{|c_g|}{\sum_{k=1}^K |c_k|} \cdot 100\%, \quad (6)$$

де  $K$  – загальна кількість груп ознак,  $|C_k|$  – абсолютне значення внеску  $k$ -ї групи.

Таким чином, значення  $P_g$ , відображене у круговій діаграмі, дозволяє швидко визначити, які параметри об'єкта (наприклад, ступінь пошкодження або тип ремонту) домінують у формуванні оцінки вартості відновлення.

Окрім локального пояснення для конкретного об'єкта (сценарію), у межах підходу SHAP може бути сформована глобальна оцінка впливу груп ознак, яка характеризує їх важливість у середньому по всій вибірці. Для цього для кожної групи  $g$  обчислюється глобальний внесок як середнє значення абсолютних локальних внесків:

$$\bar{C}_g = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |C_g^{(j)}|, \tag{7}$$

де  $N$  – кількість об'єктів у вибірці,  $C_g^{(j)}$  – абсолютний локальний внесок групи ознак  $g$  для  $j$ -того об'єкта.

Глобальний внесок може слугувати основою для порівняльного аналізу структури впливів у різних адміністративних розрізах (за регіонами, районами, громадами тощо). Реалізація такого порівняння є одним із напрямів подальшого розвитку цифрового двійника.

Результатом роботи стала розробка прототипу цифрового двійника пошкодженого об'єкта нерухомості, який функціонально складається з кількох взаємопов'язаних модулів. Центральним є модуль ведення відомостей про пошкодження, що формує цифровий профіль конкретного об'єкта та забезпечує повний цикл роботи з ним: створення запису, його уточнення та підтримку актуальної інформації. Під час реєстрації об'єкта користувач вносить його паспортні характеристики (адреса, тип будівлі, площа, поверховість), фіксує ступінь пошкодження, додає фотофакти та текстові коментарі. У результаті формується структурована картка об'єкта, яка відображає його поточний стан і слугує базою для подальших розрахунків.

Стрийська 45, Львів			
<ul style="list-style-type: none"> <li>ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ</li> <li>ВАРТІСТЬ ВІДНОВЛЕННЯ</li> <li>ФІНАНСУВАННЯ</li> <li>ГАЛЕРЕЯ</li> </ul>	Дата пошкодження	Категорія об'єкта	Тип об'єкта
	2025-12-27	Житловий фонд	Багатоповерховий будинок
	Регіон	Район	Територіальна громада
	Львівська область	Львівський район	Львівська міська громада
	Місто / селище	Вулиця	Будівля
	Львів	Стрийська	45
	Кількість поверхів	Площа (м²)	
9	7200.00 м²		
Тип пошкодження	Тип ремонту		
Середнє	Капітальний		
Оціночна вартість відновлення	Прогнозована вартість відновлення		
<b>48 600 000,00 грн</b>	<b>37 750 956,00 грн</b>		

Рис. 2. Інтерфейс цифрового профілю об'єкта нерухомості

Для забезпечення актуальності цифрового профілю реалізовано механізм редагування запису при надходженні нової інформації (наприклад, після повторного технічного обстеження або уточнення паспортних даних). Редагування здійснюється через окрему форму оновлення цифрового профілю (Рис. 3), у якій користувач може змінити ключові характеристики об'єкта, додати нові фотофакти чи коментарі, а також скоригувати ступінь пошкодження або тип запланованих робіт.

Дата пошкодження  
2024-03-12

Категорія об'єкта  
Житловий фонд

Тип об'єкта  
Багатоповерховий...

Територіальна громада  
Львівська міська гром

Місто / селище  
Львів

Вулиця  
Стрийська

Номер будівлі  
45

Кількість поверхів  
9

Площа (м²)  
7200 м²

Тип пошкодження  
Середнє

Тип ремонту  
Капітальний

Вартість відновлення  
€ 48600000

Коментар

Пошкоджено фасад і частково покрівлю внаслідок вибухової хвилі. Вибито вікна у під'їздах та кількох квартирах. Частково пошкоджено інженерні мережі (водопостачання).







+

ЗБЕРЕГТИ

Рис. 3. Форма оновлення цифрового профілю

На основі цифрового профілю працює модуль сценарного розрахунку "що-якщо", який перетворює двійник на інструмент варіативного планування відбудови. Він дозволяє змінювати одну або кілька характеристик об'єкта, що впливають на кошторис (наприклад, тип ремонту, уточнений ступінь пошкодження, площу/обсяг робіт), і отримувати перераховану орієнтовну вартість відновлення. Кожна комбінація змінених параметрів розглядається як окремий сценарій розрахунку, для якого система формує відповідну оцінку вартості, що дає змогу порівнювати альтернативні варіанти відбудови одного й того самого об'єкта.

Категорія об'єкта	Житловий фонд
Тип об'єкта	Багатоповерховий будинок
Територіальна громада	Львівська міська громада
Кількість поверхів	9
Площа (м <sup>2</sup> )	7200 м <sup>2</sup>
Тип пошкодження	Легке
Тип ремонту	Поточний

Оціночна вартість відновлення	Прогнозована вартість відновлення
<b>48 600 000,00 грн</b>	<b>9 142 633,00 грн</b>
<b>РОЗРАХУВАТИ</b>	

Рис. 4. Інтерфейс модулю сценарного розрахунку

Обчислення вартості забезпечує модуль машинного навчання, реалізований як незалежний ML-мікросервіс: він приймає параметри цифрового профілю або сформованого сценарію та повертає прогнозовану суму відновлення. Паралельно з цим у межах мікросервісу працює модуль інтерпретації прогнозу, що визначає внесок ключових характеристик об'єкта у підсумкову оцінку вартості. Узагальнені внески ознак подаються у вигляді часток впливу за групами  $x_1$ – $x_6$ , що може бути наочно представлено круговою діаграмою (рис. 5), де відображено відносний вклад площі, поверховості, типу будівлі, ступеня пошкодження, регіону та типу ремонту у формування вартості.

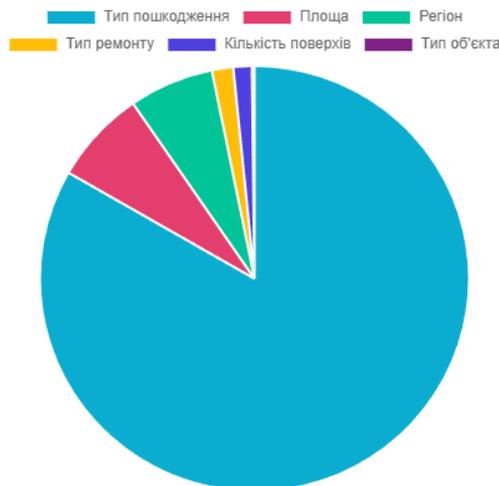


Рис. 5. Внесок характеристик у прогноз вартості відновлення

Серед наведених ознак ступінь пошкодження та тип ремонту є порядковими змінними, для яких у роботі застосовано кодування на основі методів фазифікації з трикутними функціями належності. Для оцінки ефективності цього підходу у порівнянні з традиційним one-hot кодуванням застосовано метод 5-кратної крос-валідації. Суть методу полягає у поділі вибірки на 5 рівних частин: на кожній ітерації одна частина слугує тестовою вибіркою, а решта 4 — навчальною, після чого результати усереднюються по всіх ітераціях. Такий підхід дозволяє отримати більш надійну оцінку якості моделі та зменшити вплив випадкового розподілу даних. Результати порівняння наведено у табл. 2.

Таблиця 2.

## Порівняння методів кодування порядкових ознак

Метрика	One-hot кодування	Fuzzy кодування	$\Delta$
MAE, грн	16 976 183	16 957 077	-0,1%
RMSE, грн	31 922 795	31 913 844	-0,0%
R <sup>2</sup>	0,3312	0,3315	+0,1%
MAPE, %	41,2	41,1	-0,1%

Результати свідчать, що нечітке кодування забезпечує незначне покращення всіх метрик якості прогнозування: MAE зменшується на 0,1%, що в абсолютному вимірі становить близько 19 тис. грн економії похибки на один об'єкт. Водночас статистичний аналіз (парний t-тест,  $p = 0,39$ ) показує, що ця різниця не є статистично значущою на рівні  $\alpha = 0,05$ , що пояснюється обмеженим обсягом навчальної вибірки.

Поєднання описаних методів кодування з SHAP-аналізом внесків забезпечує цілісне рішення: цифровий двійник не лише обчислює орієнтовний кошторис, а й надає прозору аргументацію. Наприклад, система може показати, що домінуючий внесок у вартість зумовлено тяжким ступенем пошкодження або вибором повної реконструкції, тоді як площа чи поверховість мають другорядний вплив. Такий підхід підсилює управлінську цінність цифрового двійника, оскільки дає змогу простежити логіку формування результатів, полегшує порівняння альтернативних сценаріїв і дає змогу обґрунтовувати відмінності у кошторисах для схожих об'єктів. Крім того, інтерпретація результатів прогнозування створює основу для раннього виявлення потенційно завищених заявок: якщо прогнозована вартість формується переважно за нетиповими або суперечливими ознаками, це може слугувати сигналом для додаткової перевірки даних об'єкта.

Обмеження дослідження стосуються насамперед репрезентативності навчальних даних і точності прогнозування вартості відновлення. По-перше, навчальні вибірки сформовано на основі відкритих даних системи ProzoGo, які охоплюють відносно невелику кількість об'єктів (приблизно 100 записів) і відображають виключно ті випадки, що стали предметом публічних закупівель. Це обмежує репрезентативність даних та може спричинити систематичні похибки. По-друге, результати валідовано лише в діапазоні вартостей від 20 до 90 млн грн, тому їх застосування за межами цього інтервалу потребує додаткової перевірки. По-третє, точність прогнозу значною мірою залежить від якості та повноти вхідних даних: відсутність або викривлення ключових параметрів (наприклад, площі чи ступеня пошкодження) може призводити до некоректних оцінок. З огляду на це, моделі машинного навчання, інтегровані в цифровий двійник, слід розглядати як інструмент попереднього аналізу, що доповнює, але не замінює проектно-кошторисну оцінку експертів.

Перспективи подальших досліджень охоплюють два напрями: розширення функціональних можливостей цифрового двійника та удосконалення модулю прогнозування. З боку розвитку двійника доцільно впровадити механізм історії та версійності сценаріїв: зберігати результати сценарних (what-if) перерахунків як окремі "версії рішення" з фіксацією дати, автора та короткого опису. Це дозволить чітко бачити, які саме сценарії розглядалися раніше, які оцінки вони давали, і на підставі чого було обрано фінальний варіант відбудови, а також за потреби повертатися до попередніх розрахунків і порівнювати їх між собою. Перспективним є також застосування глобальної інтерпретації SHAP для порівняльного аналізу структури впливів у різних адміністративних розрізах: це дозволить виявляти відмінності у домінуючих факторах формування вартості між регіонами, районами, громадами або типами об'єктів та обґрунтовувати диференційовані підходи до планування відбудови.

Підвищення точності прогнозів вартості відновлення, у свою чергу, потребує реалізації таких заходів:

- розширення навчальної вибірки – більшу кількість реальних заявок із верифікованими даними;
- інженерія ознак (feature engineering) – доповнити набір параметрів новими обчислюваними характеристиками, такими як: вік будівлі, орієнтовна вартість 1 м<sup>2</sup>, відстань до лінії зіткнення, тип забудови та інші релевантні характеристики;
- аугментація даних – збільшити обсяг вибірки шляхом генерації штучних записів на основі незначних перетворень наявних даних;

### Висновки з даного дослідження

#### і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Стаття спрямована на розв'язання науково-практичної проблеми відсутності інтегрованих рішень, які б поєднували реєстрацію пошкоджень, прогнозування витрат і сценарний перерахунок вартості у межах одного цифрового інструменту. Для її вирішення розроблено цифровий двійник пошкодженого об'єкта, який забезпечує формування цифрового профілю, автоматизований розрахунок орієнтовної вартості відновлення, сценарний (what-if) аналіз та інтерпретацію отриманих оцінок.

Результатом дослідження стала реалізація прототипу цифрового двійника у вигляді взаємопов'язаних компонентів, що забезпечують повний цикл роботи з пошкодженим об'єктом. Основою є цифровий профіль, у якому зберігаються паспортні характеристики, геопросторова прив'язка та фотофакти пошкоджень. На його основі функціонує модуль сценарного "що-якщо" аналізу, який дозволяє змінювати параметри об'єкта та оперативно отримувати перераховані оцінки вартості для альтернативних варіантів відбудови. Розрахунок вартості реалізовано у вигляді автономного ML-мікросервісу (Python/REST) на основі регресійної моделі XGBoost. Для коректного представлення порядкових категоріальних ознак (ступінь пошкодження, тип ремонту) застосовано методи фазифікації з трикутними функціями належності, що дозволяє зберегти інформацію про

градаційну структуру цих змінних. Додатково передбачено модуль інтерпретації, який визначає внесок ключових характеристик об'єкта у підсумкову оцінку та забезпечує пояснюваність результатів для практичного використання у процесах планування та контролю.

Винесення обчислень у незалежний ML-мікросервіс забезпечує технологічну ізоляцію компонентів цифрового двійника та спрощує його супровід. Зокрема, модель прогнозування можна оновлювати або перенавчати без змін у основному веб-додатку, а розрахунки масштабувати незалежно від інших частин системи. Це підвищує практичну придатність рішення, оскільки дозволяє ефективно працювати в умовах значного навантаження, забезпечуючи швидкий сценарний перерахунок і стабільність роботи цифрового двійника.

Практична цінність розробленого цифрового двійника визначається трьома ключовими можливостями: оперативно моделювати альтернативні сценарії відновлення, отримувати орієнтовні оцінки вартості та аналізувати вплив окремих характеристик об'єкта на кінцевий результат за допомогою SHAP-інтерпретації. Це сприяє прозорості бюджетного планування й аргументованості управлінських рішень. Водночас отримані оцінки слід розглядати як інструмент попереднього аналізу, що доповнює, але не замінює проектно-кошторисні та експертні процедури.

Дослідження має низку обмежень. Зокрема, навчальна вибірка є невеликою (близько 100 записів) і базується на відкритих даних публічних закупівель, що може впливати на її репрезентативність. Результати прогнозування валідовано лише в діапазоні вартостей 20–90 млн грн, тому застосування моделі за межами цього інтервалу потребує додаткової перевірки. З огляду на це, точність прогнозу суттєво залежить від повноти й коректності параметрів цифрового профілю.

Перспективи подальших досліджень охоплюють два напрями. Перший пов'язаний з розвитком цифрового двійника шляхом впровадження історії та версійності сценаріїв: зберігати результати сценарних (what-if) перерахунків як окремі "версії рішення" з датою, автором і коротким описом, що дозволить відслідковувати, які варіанти розглядалися, які оцінки вони давали та на якій підставі було обрано фінальний варіант відбудови. Другий напрям стосується підвищення точності прогнозів вартості відновлення за рахунок розширення верифікованої вибірки, інженерії ознак (вік будівлі, орієнтовна вартість 1 м<sup>2</sup>, відстань до лінії фронту тощо) та аугментації даних.

## Література

1. Росія заплатить: проєкт зі збору, оцінки й аналізу інформації про матеріальні втрати України від війни з Росією. Київська школа економіки. URL: <https://kse.ua/russia-will-pay/> (дата звернення: 05.01.2025).
2. Бакурова А. В., Білий В. В. Розробка інформаційно-аналітичної системи для фіксації руйнувань внаслідок російської агресії. *Комунальне господарство міст*. 2025. Т. 3. Вип. 191. С. 2–10. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-2-10>
3. Bakurova A., Bilyi V. Development of an approach for predicting the cost of damaged infrastructure recovery with microservice implementation. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. Vol. 5. No. 2(85). P. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.339773>
4. Liu C., Zhang P., Xu X. Literature review of digital twin technologies for civil infrastructure. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*. 2023. Vol. 2. No. 3. Article 100050. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iintel.2023.100050>
5. Comprehensive digital twin for infrastructure: A novel ontology and graph-based modelling paradigm / T. Li et al. *Advanced Engineering Informatics*. 2024. Vol. 62, Part B. Article 102747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102747>
6. Digital twin in transportation infrastructure management: a systematic review / B. Yan et al. *Intelligent Transportation Infrastructure*. 2023. Vol. 2. Article liad024. DOI: <https://doi.org/10.1093/iti/liad024>
7. Oettl F., Eckart L., Schilp J. Cost estimation approach of a digital twin implementation in industry. *Procedia CIRP*. 2023. Vol. 118. P. 318–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.06.055>
8. Serugga J. Digital Twins and AI Decision Models: Advancing Cost Modelling in Off-Site Construction. *Eng*. 2025. Vol. 6. No. 2. Article 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/eng6020022>
9. Digital Twin for Civil Engineering Systems: An Exploratory Review for Distributed Sensing Updating / M. F. Bado et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22. No. 9. Article 3168. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22093168>
10. What-If Scenarios for the BedreFlyt Digital Twin / Å. A. A. Kløvstad et al. *Principles of Formal Quantitative Analysis*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 15760. Springer, Cham, 2026. P. 360–381. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-97439-7\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-97439-7_18)
11. Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies, and Future Directions / H. Omrany et al. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 14. Article 10908. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151410908>
12. Infrastructure digital twin technology: A new paradigm for future construction industry / T. D. Moshood et al. *Technology in Society*. 2024. Vol. 77. Article 102519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102519>
13. Kaveh H., Alhadj R. Advancing civil infrastructure with digital twins: a review of applications and challenges. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2025. Vol. 31. No. 8. P. 828–842. DOI: <https://doi.org/10.3846/jcem.2025.24921>

14. Босенко І. В. Моделі і методи штучного інтелекту в процесі виконання будівельно-технічної експертизи. *Управління розвитком складних систем*. 2025. № 61. С. 180–186. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.61.180-186>
15. Матвієнко О. М., Закутній С. О. Нечітка логіка в задачах визначення економічних параметрів виконання проєктів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1(27). С. 96–108. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.096>
16. Ревенчук І. А., Стешко В. Ю. Архітектурні рішення і методи оптимізації для підвищення продуктивності додатків на Node.js та Vue.js. *Біоніка інтелекту*. 2022. № 1(98). С. 64–69. DOI: [https://doi.org/10.30837/bi.2022.1\(98\).08](https://doi.org/10.30837/bi.2022.1(98).08)
17. Prayogi A. A., Niswar M., Indrabayu, Rijal M. Design and Implementation of REST API for Academic Information System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 875. P. 012047. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/875/1/012047>
18. Анісімов В. Г., Кунанець Н. Е. Перехід від монолітної до мікросервісної архітектури: методологія та досвід впровадження. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2024. № 55. С. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-55-03>
19. Lundberg S. M., Lee S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. Vol. 30. P. 4768–4777. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.07874>
20. From local explanations to global understanding with explainable AI for trees / S. M. Lundberg et al. *Nature Machine Intelligence*. 2020. Vol. 2. No. 1. P. 56–67. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0138-9>

### References

1. "Russia Will Pay: a project for collecting, assessing and analyzing information about Ukraine's material losses from the war with Russia" ["Rosiiia zaplatyt: proekt zi zboru, otsinky y analizu informatsii pro materialni vtraty Ukrainy vid viiny z Rosiieiu"], Kyiv School of Economics, available at: <https://kse.ua/russia-will-pay/> (last accessed 05.01.2025).
2. Bakurova, A., Bilyi, V. (2025), "Development of an information and analytical system for recording destruction due to Russian aggression" ["Rozrobka informatsiino-analitychnoi systemy dlia fiksatsii ruinuvan vnaslidok rosiiskoi ahresii"], *Municipal Economy of Cities*, Vol. 3, No. 191, P. 2–10. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-2-10>
3. Bakurova, A., Bilyi, V. (2025), "Development of an approach for predicting the cost of damaged infrastructure recovery with microservice implementation", *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 5, No. 2(85), P. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.339773>
4. Liu, C., Zhang, P., Xu, X. (2023), "Literature review of digital twin technologies for civil infrastructure", *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, Vol. 2, No. 3, Article 100050. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jintel.2023.100050>
5. Li, T., Rui, Y., Zhu, H., Lu, L., Li, X. (2024), "Comprehensive digital twin for infrastructure: A novel ontology and graph-based modelling paradigm", *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 62, Part B, Article 102747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102747>
6. Yan, B., Yang, F., Qiu, S., Wang, J., Cai, B., Wang, S., Zaheer, Q., Wang, W., Chen, Y., Hu, W. (2023), "Digital twin in transportation infrastructure management: a systematic review", *Intelligent Transportation Infrastructure*, Vol. 2, Article 1iad024. DOI: <https://doi.org/10.1093/iti/liad024>
7. Oettl, F., Eckart, L., Schilp, J. (2023), "Cost estimation approach of a digital twin implementation in industry", *Procedia CIRP*, Vol. 118, P. 318–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.06.055>
8. Serugga, J. (2025), "Digital Twins and AI Decision Models: Advancing Cost Modelling in Off-Site Construction", *Eng*, Vol. 6, No. 2, Article 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/eng6020022>
9. Bado, M. F., Tonelli, D., Poli, F., Zonta, D., Casas, J. R. (2022), "Digital Twin for Civil Engineering Systems: An Exploratory Review for Distributed Sensing Updating", *Sensors*, Vol. 22, No. 9, Article 3168. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22093168>
10. Kløvstad, Å. A. A., Kobialka, P., Sieve, R., Pferscher, A., Slaughter, L., Tapia Tarifa, S. L., Johnsen, E. B. (2026), "What-If Scenarios for the BedreFlyt Digital Twin", *Principles of Formal Quantitative Analysis*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 15760, Springer, Cham, P. 360–381. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-97439-7\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-97439-7_18)
11. Omrany, H., Al-Obaidi, K. M., Husain, A., Ghaffarianhoseini, A. (2023), "Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies, and Future Directions", *Sustainability*, Vol. 15, No. 14, Article 10908. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151410908>
12. Moshood, T. D., Rotimi, J. O. B., Shahzad, W., Bamgbade, J. A. (2024), "Infrastructure digital twin technology: A new paradigm for future construction industry", *Technology in Society*, Vol. 77, Article 102519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102519>
13. Kaveh, H., Alhaji, R. (2025), "Advancing civil infrastructure with digital twins: a review of applications and challenges", *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 31, No. 8, P. 828–842. DOI: <https://doi.org/10.3846/jcem.2025.24921>
14. Bosenko, I. (2025), "Models and methods of artificial intelligence in the process of construction and technical expertise" ["Modeli i metody shchuchnoho intelektu v protsesi vykonannya budivselno-tekhnichnoi ekspertzyz"], *Management of Development of Complex Systems*, No. 61, P. 180–186. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.61.180-186>
15. Matviienko, O., Zakutnii, S. (2024), "Fuzzy logic in problems of determining economic parameters of project execution" ["Nechitka lohika v zadachakh vyznachennia ekonomichnykh parametriv vykonannia proektiv"], *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1(27), P. 96–108. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.096>
16. Revenchuk, I., Steshko, V. (2022), "Architectural solutions and optimization methods to improve the performance of Node.js and Vue.js applications", *Bionics of Intelligence*, No. 1(98), P. 64–69. DOI: [https://doi.org/10.30837/bi.2022.1\(98\).08](https://doi.org/10.30837/bi.2022.1(98).08)
17. Prayogi, A., Niswar, M., Indrabayu, Rijal, M. (2020), "Design and Implementation of REST API for Academic Information System", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 875, P. 012047. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/875/1/012047>
18. Anisimov, V., Kunanets, N. (2024), "Transition from monolithic to microservice architecture: methodology and implementation experience" ["Perekhid vid monolitnoi do mikroservisnoi arkhitektury: metodolohiia ta dosvid vprovadzhennia"], *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, No. 55, P. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-55-03>
19. Lundberg, S., Lee, S.-I. (2017), "A Unified Approach to Interpreting Model Predictions", *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 30, P. 4768–4777. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.07874>
20. Lundberg, S., Erion, G., Chen, H., DeGrave, A., Prutkin, J., Nair, B., Katz, R., Himmelfarb, J., Bansal, N., Lee, S.-I. (2020), "From local explanations to global understanding with explainable AI for trees", *Nature Machine Intelligence*, Vol. 2, No. 1, P. 56–67. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0138-9>