

Мацієвський Олексій ОлеговичORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2341-8166>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

Асистент кафедри інформаційних технологій

Ачкасов Ігор АнатолійовичORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7049-0530>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

Доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій

Босенко Ігор ВалерійовичORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9046-4380>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

Доктор філософії, старший викладач кафедри інформаційних технологій

Історія статті:

Надійшла: 30.01.2026

Прийнята: 25.02.2026

Опублікована: 26.03.2026

**КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ
ПОШКОДЖЕНИХ ОБ'ЄКТІВ ІНФРАСТРУКТУРИ**

***Анотація.** Досліджено проблематику інтеграції цифрових двійників, AI-агентних систем та мультимодальної взаємодії людини з комп'ютером у задачах моніторингу та динамічної верифікації стану пошкоджених об'єктів інфраструктури. Актуальність роботи зумовлена зростанням складності сучасних інфраструктурних систем, необхідністю оперативного реагування на пошкодження, фрагментарністю інформаційних потоків у кризових умовах та підвищеними вимогами до достовірності, прозорості й обґрунтованості управлінських рішень. Традиційні підходи до моніторингу не забезпечують достатнього рівня інтеграції різнорідних джерел даних і адаптивності до змін середовища, що зумовлює потребу у застосуванні інтелектуальних кіберфізичних рішень. Здійснено систематизацію сучасних наукових підходів до побудови цифрових двійників для цивільної інфраструктури, проаналізовано роль AI-агентних механізмів у координації аналітичних процедур та узагальнено концептуальні основи та тенденції розвитку мультимодальної взаємодії в інтелектуальних інформаційних системах. Особливу увагу приділено формуванню архітектурної структури створення цифрового двійника пошкодженого об'єкта на основі інтеграції сенсорних, візуальних, геопросторових і експертних даних із подальшою їх синхронізацією, нормалізацією, структурною прив'язкою та процедурою динамічної верифікації. Результатом дослідження є формування концептуальних основ інтегрованої системи, у якій цифровий двійник виступає ядром інформаційної моделі об'єкта, AI-агентна система забезпечує адаптивну аналітичну підтримку, координацію процесів обробки та узгодження даних, а мультимодальна взаємодія створює людино-орієнтований механізм включення експерта до контуру системи прийняття рішень. Визначено ключові проблемні аспекти, пов'язані з достовірністю цифрових моделей в умовах невизначеності, міжагентною координацією в розподілених середовищах, пояснюваністю аналітичних результатів, синхронізацією модальностей взаємодії та стандартизацією архітектур інтеграції. Узагальнення проведеного дослідження дозволяє стверджувати, що інтеграція цифрових двійників, AI-агентних технологій і мультимодальної взаємодії формує концептуальні передумови для підвищення стійкості, масштабованості, адаптивності та ефективності управління розвитком складних інфраструктурних об'єктів у динамічному та невизначеному середовищі.*

Ключові слова: цифровий двійник; AI-агентна система; мультимодальна взаємодія; динамічна верифікація; пошкоджені об'єкти; інтегровані інформаційні системи

Актуальність дослідження

Сучасний розвиток інфраструктурних систем відбувається в умовах зростання їх структурної складності, інтеграції кіберфізичних компонентів та

цифровізації процесів управління. Пошкодження об'єктів інфраструктури внаслідок техногенних впливів, аварій або надзвичайних ситуацій потребують оперативного моніторингу технічного стану та прийняття обґрунтованих управлінських

рішень на основі достовірних даних. У наукових дослідженнях останніх років підкреслюється необхідність переходу від ізольованих інформаційних систем до інтегрованих платформ, здатних забезпечувати безперервну синхронізацію фізичного об'єкта з його цифровим представленням [1; 2]. Концепція створення цифрового двійника розглядається як ключовий інструмент реалізації такого підходу. Цифровий двійник забезпечує формування динамічної моделі об'єкта з можливістю її оновлення на основі сенсорних, візуальних, геопросторових та аналітичних даних, що дозволяє здійснювати прогнозування стану, оцінювання ризиків та підтримку управлінських рішень [3; 4]. Водночас у випадку пошкоджених інфраструктурних об'єктів актуалізується проблема динамічної верифікації цифрового двійника, яка полягає в узгодженні параметрів цифрової моделі з реальним станом об'єкта в умовах неповноти, неоднорідності та зашумленості інформації.

Разом із тим автоматизовані аналітичні механізми потребують ефективної інтеграції з діяльністю людини-експерта. У сучасних дослідженнях з взаємодії людини з комп'ютером акцент робиться на мультимодальних підходах, які передбачають поєднання візуальних, мовних, текстових та інших каналів комунікації з використанням нейромережових моделей обробки інформації [7; 8]. Мультимодальна взаємодія сприяє зниженню когнітивного навантаження, підвищенню швидкості інтерпретації результатів аналізу та забезпеченню більш ефективної підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності.

Аналіз сучасних публікацій свідчить про активний розвиток напрямів цифрових двійників, агентних технологій та мультимодальної взаємодії окремо. Однак питання їх комплексної інтеграції у задачах динамічної верифікації цифрових двійників пошкоджених об'єктів інфраструктури залишаються недостатньо систематизованими. Це обумовлює необхідність узагальнення сучасних підходів і визначення концептуальних засад формування інтегрованих інформаційних рішень у контурі «цифровий двійник – AI-агентна система – людина-експерт» для підтримки управління розвитком складних систем.

Мета статті

Метою статті є узагальнення сучасних наукових підходів до побудови AI-агентних систем моніторингу та верифікації цифрових двійників пошкоджених об'єктів інфраструктури, а також формування узагальненої концепції розроблення моделей мультимодальної взаємодії людини з такими системами в контексті підтримки управлінських рішень.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій

Для досягнення мети дослідження процес створення цифрових двійників доцільно розглядати як базовий інструмент інтелектуального моніторингу та технічного обслуговування цивільної інфраструктури, зокрема завдяки поєднанню IoT-збірок даних, моделей об'єктів та платформних рішень для підтримки життєвого циклу. У роботі Sun та співавт [9] запропоновано узагальнений підхід до розроблення цифрових двійників для цивільної інфраструктури з акцентом на дані, моделювання, платформні вимоги та типові виклики (інтеграція різнорідних джерел, якість даних, експлуатаційні обмеження). Для задач моніторингу та обслуговування це створює методологічну основу, однак вказує на системну проблему: навіть за наявності платформи цифрового двійника питання оперативного узгодження «фізичний стан ↔ цифрова модель» у динамічному середовищі та за неповних даних залишається одним із найскладніших.

Перехід від поняття «цифрового двійника як моделі» до визначення «цифрового двійника як активної системи прийняття рішень» підсилює інтерес до агентних підходів. У статті ACM «The Role of Multi-Agents in Digital Twin Implementation» [10] агенти розглядаються як практичний механізм для оркестрації функцій цифрового двійника, зокрема для управління потоками даних, координації задач, автономізації компонентів і підтримки адаптивності. Водночас у таких роботах, як правило, фокус робиться на ролях і сценаріях застосування агентів у загальних DT-архітектурах, тоді як для інфраструктурних об'єктів у стані пошкодження критичними стають специфічні вимоги: робота з суперечливими свідченнями (сенсори/візуальні дані/експертні оцінки), пріоритезація перевірок, а також формалізація процедур верифікації, де агентна система не просто «керує даними», а підтримує процес доведення актуальності та/або коректності стану двійника для прийняття управлінських рішень.

Окремим напрямом є розроблення інтелектуальних цифрових двійників, у яких агентні компоненти інтегруються з предметною моделлю та знаннями домену. Yoon та співавт. [11] пропонують концепцію AI agent-based intelligent digital twins (DT) з онтологічною складовою для середовищ експлуатації будівель (O&M), де агенти «вбудовані» у контекст даних та процесів і можуть враховувати експертні знання під час інтерпретації станів. Такий підхід важливий для інфраструктури, оскільки демонструє тенденцію до поєднання агентності з формалізацією знань, однак для задач пошкоджених об'єктів залишається відкритим питання: як організувати динамічну верифікацію при різкій зміні

стану, деградації якості даних і необхідності швидкої людино-орієнтованої інтерпретації результатів агентів (зрозумілі пояснення, підтвердження / спростування гіпотез пошкоджень, пріоритезація дій).

Паралельно з еволюцією DT та агентних архітектур швидко розвивається напрям мультимодальної взаємодії, де сучасні системи поєднують різні канали введення/виведення та методи мультимодального злиття для підвищення природності й ефективності комунікації людини з системою. Огляд Dritisas (2025) [12] систематизує підходи до мультимодальної взаємодії, включаючи ключові технічні питання (синхронізація модальностей, рівні інтеграції/злиття, контекстна адаптація) та підкреслює тренд до контекстно-обізнаних, адаптивних інтерфейсів. Для цифрових двійників пошкодженої інфраструктури це принципово важливо, оскільки оператор працює з великим обсягом неоднорідної інформації і має швидко переходити між “оглядом ситуації” та “перевіркою конкретних тверджень” щодо стану. Водночас у загальних оглядах мультимодальності зазвичай недостатньо деталізовано, як саме мультимодальні інтерфейси мають підтримувати процедури верифікації цифрового двійника, тобто не лише показувати дані, а забезпечувати керований діалог “система ↔ експерт” для підтвердження станів і пояснення причин невідповідностей.

Узагальнюючи, розглянуті публікації демонструють достатньо високий рівень зрілості окремих технологічних і методологічних складових: сформовано підходи до побудови цифрових двійників цивільної інфраструктури, окреслено роль агентних механізмів у реалізації розподілених аналітичних функцій, розвиваються концепції інтелектуалізації DT через інтеграцію знань та онтологічних моделей, активно вдосконалюються методи мультимодальної взаємодії. Водночас між цими напрямками зберігається фрагментарність. Більшість досліджень розглядає цифрові двійники, агентні системи або мультимодальні інтерфейси ізольовано, тоді як задачі пошкодженої інфраструктури вимагають їх системної інтеграції в межах єдиного управлінського контуру.

Особливо недостатньо дослідженим залишається питання формалізації процесів динамічної верифікації цифрового двійника в умовах невизначеності, деградації інформаційних потоків та необхідності оперативної експертної оцінки. Відсутність узгоджених моделей взаємодії між цифровою моделлю, агентним аналітичним шаром і людиною-експертом ускладнює побудову цілісних архітектурних рішень для післяаварійних сценаріїв.

Результати опрацювання підтверджують доцільність створення цифрового двійника пошкодженого об'єкта інфраструктури з

урахуванням джерел даних, процедур їх інтеграції та механізмів оновлення моделі, яка дає змогу системно відобразити взаємозв'язок між фізичним об'єктом, інформаційними потоками та цифровою репрезентацією його стану (рис. 1).



Рисунок 1 – Узагальнена структурно-функціональна схема створення цифрового двійника інфраструктурного об'єкта

Концепція цифрового двійника

У сучасних умовах управління розвитком складних інфраструктурних систем ефективність інформаційної підтримки визначається не лише якістю окремих технологічних компонентів, а й рівнем їх інтеграції в єдине функціональне середовище, здатне забезпечувати узгодженість даних, адаптивність аналітичних процедур і прозорість управлінських рішень. Фрагментарне використання цифрових технологій без системної взаємодії між ними суттєво обмежує можливості оперативного реагування на зміни технічного стану об'єктів, особливо в умовах пошкоджень або кризових ситуацій. У цьому контексті цифровий двійник, AI-агентна система та мультимодальна взаємодія людини з комп'ютером доцільно розглядати як взаємодоповнюючі складові

інтегрованої архітектури моніторингу та динамічної верифікації стану інфраструктурних об'єктів. Їх поєднання формує цілісний інформаційно-аналітичний контур, орієнтований на підтримку прийняття рішень в умовах невизначеності.

Цифровий двійник виступає ядром інформаційної моделі об'єкта та забезпечує структуроване представлення його геометричних, фізичних, функціональних і експлуатаційних характеристик у цифровому середовищі. Він інтегрує параметричні моделі, просторові дані, часові ряди вимірювань та результати інспекцій, що дозволяє формувати багатовимірну картину стану об'єкта. У задачах післяпошкоджувального аналізу цифровий двійник відіграє ключову роль у фіксації змін параметрів конструкцій, відображенні локалізації пошкоджень, моделюванні сценаріїв розвитку дефектів і прогнозуванні можливих наслідків управлінських рішень. Крім того, він акумулює дані з сенсорних підсистем, систем дистанційного моніторингу, результатів візуальних обстежень та експертних оцінок, забезпечуючи їх узгодження в межах єдиного інформаційного простору. Саме здатність цифрового двійника до постійної актуалізації та відображення поточного стану об'єкта робить його основою для процедур верифікації та контролю достовірності даних.

AI-агентна система виконує функцію інтелектуального аналітичного шару інтегрованої архітектури, забезпечуючи автоматизацію обробки інформації та координацію взаємодії між компонентами системи. Агентний підхід передбачає наявність автономних або напівавтономних модулів, що спеціалізуються на виконанні конкретних завдань: попередній обробці даних, виявленні аномалій, оцінюванні ризиків, формуванні гіпотез щодо змін технічного стану, аналізі сценаріїв розвитку подій та підтримці процедур верифікації цифрового двійника. У контексті пошкоджених інфраструктурних об'єктів агенти забезпечують координацію інформаційних потоків, узгодження даних з різних джерел та адаптивну реакцію на виявлені невідповідності між прогнозованими і фактичними показниками. Таким чином, AI-агентна

система підвищує гнучкість та масштабованість інтегрованого рішення, дозволяючи оперативно коригувати аналітичні процедури залежно від зміни умов функціонування об'єкта.

Мультимодальна взаємодія забезпечує інтеграцію людини-експерта в контур функціонування системи та створює умови для ефективного використання результатів аналітичної обробки. Поєднання візуальних інтерфейсів (тривимірні моделі, карти пошкоджень, графіки змін параметрів), текстових повідомлень, голосових команд, тактильних або жестових елементів керування дозволяє реалізувати адаптивний механізм подання інформації. Такий підхід сприяє зниженню когнітивного навантаження на користувача, підвищує прозорість інтерпретації результатів та забезпечує можливість оперативного уточнення або підтвердження аналітичних висновків. В умовах післяаварійних сценаріїв, де рішення мають прийматися швидко та на основі неповної інформації, мультимодальна взаємодія стає важливим чинником забезпечення достовірності управлінських дій.

У межах інтегрованої системи взаємодія зазначених компонентів реалізується у вигляді замкненого контуру обміну даними та керуючими впливами. Дані про фізичний стан об'єкта надходять до цифрового двійника через механізми збору та інтеграції інформації, після чого AI-агенти здійснюють їх аналіз, оцінювання ризиків і ініціюють процедури динамічної верифікації. Результати аналітичної обробки передаються користувачу через мультимодальні інтерфейси, а експертні рішення, уточнення або коригувальні дії повертаються до системи у вигляді зворотного зв'язку. Це впливає на актуалізацію параметрів цифрової моделі та подальші аналітичні процедури, забезпечуючи безперервний цикл удосконалення інформаційної репрезентації об'єкта. Таким чином формується людино-орієнтований механізм підтримки прийняття управлінських рішень, у якому цифровий двійник, AI-агентна система та мультимодальна взаємодія функціонують як єдина інтегрована структура, що узагальнено зображено на рис. 2.



Рисунок 2 - Концептуальна архітектура інтегрованої системи моніторингу та динамічної верифікації цифрових двійників пошкоджених об'єктів інфраструктури

Динамічна верифікація цифрового двійника

Динамічна верифікація цифрового двійника пошкодженого об'єкта інфраструктури є ключовим процесом, що забезпечує підтримання відповідності між фізичним станом об'єкта та його цифровим представленням. На відміну від статичної перевірки параметрів моделі, динамічна верифікація передбачає безперервний або періодичний аналіз змін стану, оцінювання достовірності отриманих даних і коригування цифрової моделі відповідно до нових інформаційних надходжень.

У контексті пошкоджених інфраструктурних об'єктів процес верифікації ускладнюється наявністю неповних або суперечливих даних, різноманітністю джерел інформації та необхідністю врахування експертних суджень. Це зумовлює потребу у концептуальному підході, який поєднує автоматизовані аналітичні механізми з участю людини в прийнятті рішень. Такий підхід передбачає організацію людино-орієнтованої AI-агентної системи, у якій цифровий двійник, агентні компоненти та інтерфейс взаємодії функціонують у межах єдиного управлінського контуру.

У загальному вигляді процес динамічної верифікації може бути представлений як послідовність етапів: отримання та агрегування даних; попередній аналіз і виявлення потенційних невідповідностей; формування гіпотез щодо змін стану; перевірка гіпотез; коригування параметрів цифрового двійника. На кожному з цих етапів AI-агенти можуть виконувати спеціалізовані функції, забезпечуючи автоматизацію рутинних процедур та підготовку аналітичних висновків.

Важливим елементом концептуальної організації системи є забезпечення прозорості та пояснюваності результатів роботи AI-агентів. Для підтримки довіри до системи оператор повинен мати можливість простежити логіку формування висновків, отримати доступ до джерел даних та оцінити ступінь невизначеності результатів. Це створює передумови для впровадження механізмів пояснюваного штучного інтелекту в структурі агентної системи.

Мультимодальна взаємодія відіграє системоутворювальну роль у процесі верифікації. Вона забезпечує гнучке представлення інформації про стан цифрового двійника та результати аналізу в різних формах – графічній, текстовій, мовній або комбінованій. Адаптивність інтерфейсу дозволяє змінювати рівень деталізації інформації залежно від характеру ситуації: у стандартному режимі оператор отримує узагальнені показники, тоді як у разі виявлення критичних відхилень система переходить до розширеного представлення параметрів і пропонує варіанти дій.

Концептуально динамічна верифікація цифрового двійника в людино-орієнтованій AI-агентній системі може бути розглянута як замкнений цикл управління, у якому дані з фізичного об'єкта трансформуються в аналітичні висновки, інтерпретуються експертом і використовуються для коригування моделі та прийняття рішень. Такий підхід забезпечує підвищення надійності цифрового представлення об'єкта, зменшення ризику прийняття помилкових управлінських рішень та створює передумови для більш ефективного управління розвитком складних інфраструктурних систем у кризових та післяаварійних умовах.

Особливості застосування

Застосування інтегрованих систем моніторингу цифрових двійників у випадку пошкоджених об'єктів інфраструктури має низку специфічних особливостей, що відрізняють такі сценарії від стандартних режимів експлуатації. Передусім йдеться про підвищений рівень невизначеності, фрагментарність даних, обмеженість часу на прийняття рішень та необхідність координації між різними суб'єктами управління.

Однією з ключових проблем є неповнота або деградація інформаційних потоків. Пошкодження сенсорних мереж, перебої в комунікаційних каналах або відсутність доступу до окремих елементів об'єкта ускладнюють формування цілісної картини стану. У таких умовах цифровий двійник повинен функціонувати не лише як відображення фактичних вимірювань, а й як модель, здатна працювати з припущеннями, оцінками невизначеності та альтернативними сценаріями розвитку подій.

AI-агентна система у післяпошкоджувальному середовищі виконує роль адаптивного механізму, який перерозподіляє аналітичні функції залежно від доступності даних та пріоритетності задач. Наприклад, за відсутності частини сенсорної інформації агенти можуть активізувати механізми оцінювання стану на основі непрямих показників або історичних даних. Водночас у кризових умовах зростає значення швидкості обробки інформації та здатності системи оперативно формувати попередні висновки для підтримки термінових рішень.

Особливу роль відіграє людина-експерт, яка залишається центральним суб'єктом прийняття управлінських рішень. У післяаварійних сценаріях експерт може володіти контекстною інформацією, недоступною автоматизованим системам, зокрема щодо специфіки конструктивних рішень, попередніх ремонтів або експлуатаційних особливостей. Мультимодальна взаємодія забезпечує ефективне включення такого знання в інформаційний контур, дозволяючи оператору швидко аналізувати ситуацію, уточнювати параметри та коригувати результати автоматизованого аналізу.

Ще однією особливістю є необхідність підтримки різних рівнів управління – від оперативного реагування до стратегічного планування відновлювальних робіт. Інтегрована система має забезпечувати можливість переходу між цими рівнями, надаючи узагальнену інформацію для керівництва та детальні технічні дані для спеціалістів. Така багаторівнева підтримка вимагає гнучкої організації інформаційних потоків і адаптивного представлення даних залежно від ролі користувача.

Важливим чинником є також забезпечення надійності та довіри до системи в умовах підвищеного ризику. Пояснюваність результатів аналізу, прозорість процедур верифікації та можливість простеження джерел даних сприяють підвищенню прийнятності рішень, сформованих із використанням AI-агентних механізмів. У післяпошкоджувальному контексті це має принципове значення, оскільки помилки можуть мати суттєві соціально-економічні наслідки.

Таким чином, застосування інтегрованих систем моніторингу цифрових двійників у післяаварійних сценаріях потребує врахування специфіки кризового середовища, забезпечення адаптивності архітектури, активної участі людини-експерта та підтримки різнорівневого управління. Комплексне поєднання цифрового двійника, AI-агентної системи та мультимодальної взаємодії створює передумови для формування стійких інформаційних рішень, орієнтованих на ефективне управління розвитком складних інфраструктурних об'єктів у динамічних та невизначених умовах.

Проблемні питання та перспективи

Попри активний розвиток технологій цифрових двійників, AI-агентних систем та мультимодальної взаємодії, їх комплексне застосування в задачах моніторингу пошкоджених об'єктів інфраструктури супроводжується низкою проблемних питань, що потребують подальшого наукового осмислення.

Однією з ключових проблем є забезпечення достовірності цифрового двійника в умовах неповних, суперечливих або зашумлених даних. У післяаварійних сценаріях інформаційні потоки можуть бути фрагментарними, а окремі сенсорні підсистеми – недоступними або деградованими. Це створює ризик формування неточних або нестійких цифрових моделей, що безпосередньо впливає на якість управлінських рішень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення формалізованих підходів до оцінювання невизначеності та методів інтеграції альтернативних джерел інформації.

Іншою проблемою є узгодженість функціонування AI-агентів у розподілених середовищах. У багаторівневих системах, де агенти виконують різні аналітичні функції, виникає необхідність координації їх дій, уникнення конфліктів рішень та забезпечення єдиної логіки оновлення цифрового двійника. Перспективним напрямом є дослідження механізмів міжагентної взаємодії, протоколів обміну інформацією та підходів до забезпечення цілісності прийнятих рішень.

Суттєвим викликом залишається питання пояснюваності та прозорості результатів роботи AI-агентних систем. У задачах управління критичною інфраструктурою експерт повинен мати можливість оцінити логіку формування аналітичних висновків і рівень їх надійності. Відсутність зрозумілих механізмів інтерпретації результатів може знижувати довіру до системи та обмежувати її практичне застосування. Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію принципів пояснюваного штучного інтелекту в архітектуру цифрових двійників.

Окрему увагу необхідно приділити проблемам мультимодальної взаємодії в умовах високого когнітивного навантаження. Поєднання різних каналів комунікації вимагає узгодження часових і семантичних характеристик інформації, а також адаптації інтерфейсу до ролі користувача та контексту ситуації. Перспективним напрямом є дослідження адаптивних інтерфейсів, здатних змінювати спосіб подання інформації залежно від рівня критичності подій та індивідуальних характеристик оператора.

Також відкритим залишається питання стандартизації архітектурних рішень для інтеграції цифрових двійників і AI-агентних систем у наявні інфраструктурні платформи. Відсутність уніфікованих підходів ускладнює масштабування рішень та їх міжгалузеву інтеграцію. У цьому контексті важливими є дослідження, спрямовані на формування методичних рекомендацій і концептуальних моделей інтеграції в межах кіберфізичних систем.

Таким чином, подальший розвиток напряму потребує комплексних досліджень, спрямованих на підвищення достовірності цифрових двійників, координацію AI-агентних механізмів, удосконалення мультимодальної взаємодії та забезпечення архітектурної сумісності інтегрованих систем. Системне вирішення зазначених проблем створить підґрунтя для формування стійких і адаптивних інформаційних рішень у сфері управління розвитком складних інфраструктурних об'єктів.

Висновки

У статті здійснено узагальнення сучасних наукових підходів до застосування цифрових двійників, AI-агентних систем та мультимодальної взаємодії людини з комп'ютером у задачах моніторингу та динамічної верифікації стану пошкоджених об'єктів інфраструктури. Показано, що цифровий двійник виступає базовою інформаційною моделлю об'єкта, яка забезпечує інтеграцію різнорідних даних та формує аналітичну основу для підтримки управлінських рішень у складних і динамічних умовах.

Проаналізовано архітектурні підходи до побудови інтегрованих систем моніторингу та визначено роль AI-агентних механізмів як адаптивного інтелектуального шару, здатного забезпечувати розподілену обробку даних, координацію аналітичних процедур і підтримку процесів динамічної верифікації цифрового двійника. Узагальнення наукових публікацій дозволило визначити, що саме інтеграція агентних підходів із цифровими моделями створює передумови для підвищення масштабованості, стійкості та гнучкості інформаційних рішень у сфері управління складними інфраструктурними системами.

Окреслено значення мультимодальної взаємодії як системоутворюючого компонента людино-орієнтованих рішень. Встановлено, що поєднання різних каналів комунікації та адаптивне представлення інформації сприяють підвищенню прозорості аналітичних процедур, зниженню когнітивного навантаження на оператора та

покращенню обґрунтованості прийняття рішень у післяварійних сценаріях.

Визначено проблемні питання, пов'язані з достовірністю цифрових двійників в умовах невизначеності, координацією AI-агентів у розподілених середовищах, забезпеченням пояснюваності рішень та стандартизацією архітектур інтеграції. Систематизація зазначених аспектів дозволяє сформувати концептуальне бачення інтегрованої інформаційної системи, у якій цифровий двійник, AI-агентна система та мультимодальна взаємодія функціонують у межах єдиного управлінського контуру.

Отримані узагальнення та визначені напрями подальших досліджень можуть бути використані як концептуальна основа для розвитку інтелектуальних систем моніторингу та верифікації цифрових двійників у сфері управління розвитком складних інфраструктурних об'єктів, зокрема в умовах кризових та післяварійних сценаріїв.

Конфлікт інтересів. Автори підтверджують відсутність фінансових, особистих чи інших інтересів, що можуть розглядатися як потенційний конфлікт інтересів щодо публікації цієї статті.

Фінансування. Дослідження було проведено без фінансової підтримки.

Доступність даних. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті рукопису.

Використання штучного інтелекту. Автори підтверджують, що при створенні даної роботи вони не використовували інструментальні засоби штучного інтелекту.

Список використаних джерел / References

1. Huzaiifa, A. J. (2023). Predictive maintenance of heat exchangers using digital twin models systematic literature review. *ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, 2–5 October 2023*. URL: <https://doi.org/10.2118/216700-ms>
2. Kerrouchi, S., Aghezaf, E.-H., & Cottyn, J. (2024). Production digital twin: a systematic literature review of challenges. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1–26. URL: <https://doi.org/10.1080/0951192x.2024.2314792>
3. Schank, M. (2023). Modeling platform and data infrastructure. In *Digital Transformation Success* (pp. 215–233). Berkeley, CA. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9816-9_10
4. Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access*, 8, 21980–22012. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2970143>
5. Dolhopolov, S., et al. (2025). Explainable artificial intelligence for multimodal sentiment analysis in revitalization project management. *Radioelektronni i kompiuterni systemy*, 2025(4), 95–111. URL: <https://doi.org/10.32620/reks.2025.4.07>
6. Terenchuk, S., Pasko, R., Bosenko, I., Buhrov, A., Yaschenko, A., & Volokh, B. (2023). Ontology formation of support system for restoration of buildings, property and infrastructure objects. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. URL: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10313006>
7. Lazaro, M. J., et al. (2021). A review of multimodal interaction in intelligent systems. In *Human-Computer Interaction. Theory, Methods and Tools* (pp. 206–219). Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-78462-1_15
8. Chernyshev, D., et al. (2022). Integration of building information modeling and artificial intelligence systems to create a digital twin of the construction site. *2022 IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. URL: <https://doi.org/10.1109/csit56902.2022.10000717>
9. Sun, Z., et al. (2024). Approach towards the development of digital twin for structural health monitoring of civil infrastructure: A comprehensive review. *Sensors*, 25(1), 59. URL: <https://doi.org/10.3390/s25010059>

10. Yogeswaranathan, K., & Collier, R. (2024). The role of multi-agents in digital twin implementation: Short survey. *ACM Computing Surveys*. URL: <https://doi.org/10.1145/3697350>
11. Yoon, S., Song, J., & Li, J. (2025). AI agent-based intelligent digital twins for building operations and maintenance. *Journal of Building Engineering*, 112802. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112802>
12. Dritsas, E., et al. (2025). Multimodal interaction, interfaces, and communication: A survey. *Multimodal Technologies and Interaction*, 9(1), 6. URL: <https://doi.org/10.3390/mti9010006>
13. Honcharenko, T. A. (2022). Modern information technologies for modeling the urban environment and developing digital twins of urban objects. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, 51, 87–93. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.51.87-93> [in Ukrainian]

Oleksii MatsiievskiyORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2341-8166>*Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine*

Assistant of the Department of Information Technologies

Igor AchkasovORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7049-0530>*Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine*

D.Sc., Professor, Professor of the Department of Information Technologies

Ihor BosenkoORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9046-4380>*Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine*

PhD, Senior Lecturer of the Department of Information Technologies

**CONCEPTUAL FOUNDATIONS FOR CREATING DIGITAL TWINS
OF DAMAGED INFRASTRUCTURE OBJECTS**

Abstract. *The article explores the issues of integrating digital twins, AI-agent systems, and multimodal human-computer interaction in the tasks of monitoring and dynamic verification of the state of damaged infrastructure objects. The relevance of the work is driven by the increasing complexity of modern infrastructure systems, the need for rapid response to damage, the fragmentation of information flows in crisis conditions, and heightened requirements for the reliability, transparency, and validity of management decisions. Traditional monitoring approaches do not provide a sufficient level of integration of heterogeneous data sources and adaptability to environmental changes, which necessitates the use of intelligent cyber-physical solutions. The study systematizes modern scientific approaches to building digital twins for civil infrastructure, analyzes the role of AI-agent mechanisms in coordinating analytical procedures, and generalizes the conceptual foundations and development trends of multimodal interaction in intelligent information systems. Particular attention is paid to the formation of the architectural structure for creating a digital twin of a damaged object based on the integration of sensory, visual, geospatial, and expert data, followed by their synchronization, normalization, structural binding, and dynamic verification procedure. The result of the study is the formation of the conceptual foundations of an integrated system where the digital twin acts as the core of the object's information model, the AI-agent system provides adaptive analytical support, coordination of processing and data reconciliation, and multimodal interaction creates a human-oriented mechanism for including an expert in the decision-making system loop. Key problematic aspects related to the reliability of digital models under uncertainty, multi-agent coordination in distributed environments, explainability of analytical results, synchronization of interaction modalities, and standardization of integration architectures are identified. The generalization of the conducted research suggests that the integration of digital twins, AI-agent technologies, and multimodal interaction forms the conceptual prerequisites for increasing the resilience, scalability, adaptability, and efficiency of managing the development of complex infrastructure objects in a dynamic and uncertain environment.*

Keywords: *digital twin; AI-agent system; multimodal interaction; dynamic verification; damaged objects; integrated information systems*

Посилання на публікацію

- APA Matsiievskiy, O. O., Achkasov, I. A., & Bosenko, I. V. (2026). Conceptual foundations for creating digital twins of damaged infrastructure objects. *Management of Development of Complex Systems*, 65, 173–180, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2026.65.173-180](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2026.65.173-180).
- ДСТУ Мацієвський О. О., Ачкасов І. А., Босенко І. В. Концептуальні основи створення цифрових двійників пошкоджених об'єктів інфраструктури. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2026. № 65. С. 173 – 180, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2026.65.173-180](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2026.65.173-180).