

Напрями впровадження цифрових технологій і систем штучного інтелекту для моніторингу та оптимізації сталості

Софія Павленко, бакалавр¹ (ORCID: 0009-0007-2971-0435)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

АНОТАЦІЯ

Сучасна будівельна галузь стоїть перед нагальними викликами, пов'язаними з низькою продуктивністю та значним негативним впливом на довкілля. Досліджено ключові напрями впровадження цифрових технологій та систем штучного інтелекту (ШІ) для забезпечення сталого розвитку. Особливу увагу приділено концепції синергії інформативного моделювання будівель (BIM), штучного інтелекту, цифрового двійника (Digital Twin) та Інтернету речей (IoT), яка дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління повним життєвим циклом будівлі. Розглянуто практичні застосування цих технологій для оптимізації споживання ресурсів, мінімізації відходів та підвищення енергоефективності. Додатково проаналізовано роль генеративного дизайну в архітектурному проектуванні та вплив робототехніки на підвищення продуктивності та безпеки. Виявлено основні бар'єри на шляху впровадження інновацій та оцінено перспективи їх подолання. В українському контексті цифровізація набуває стратегічного значення, виступаючи ключовим інструментом для забезпечення прозорості та підзвітності процесів відбудови.

Ключові слова: цифровізація, стале будівництво, штучний інтелект, BIM, цифровий двійник, IoT, управління відходами, енергоефективність.

1. ВСТУП

Будівельна галузь є одним із найменш інноваційних секторів світової економіки, що призводить до низької продуктивності та значних екологічних проблем. За оцінками, щорічно галузь генерує 1.3 мільярда тонн відходів. Ця ситуація вимагає радикальної трансформації, яка можлива лише через впровадження інноваційних цифрових технологій.

2. МЕТА

Аналіз ключових напрямів впровадження цифрових технологій та систем штучного інтелекту для моніторингу й оптимізації сталості в будівельній галузі. Завдання дослідження полягають у систематизації провідних технологій (BIM, ШІ, цифрові двійники, IoT), визначенні практичних сфер їх застосування для підвищення ефективності та аналізі бар'єрів впровадження.

3. СИНЕРГІЯ КЛЮЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Повноцінне розуміння цифрової трансформації в будівництві неможливе без усвідомлення синергії ключових технологій, які не просто існують поруч, а формують єдину взаємопов'язану екосистему. Інформаційне моделювання будівель (BIM) є фундаментом цієї екосистеми, оскільки є цифровим процесом, який об'єднує технології та дані для створення багатовимірних моделей [1].

BIM є статичною моделлю, яка описує об'єкт. Справжня трансформаційна сила розкривається при інтеграції BIM з Інтернетом речей (IoT), який забезпечує динамічний зв'язок між фізичним та віртуальним середовищем завдяки мережі сенсорів, що збирають реальні дані (температура, вологість, енергоспоживання тощо) з будівельного майданчика або готового об'єкта. Ці дані постійно оновлюють статичну BIM-модель, перетворюючи її на Цифровий двійник — динамічну віртуальну репліку, яка імітує поведінку фізичного об'єкта в реальному часі. Штучний інтелект (ШІ) виступає як «мозок» цієї системи. Він обробляє колосальні обсяги даних, що

надходять з IoT-сенсорів, виявляє приховані закономірності, прогнозує ризики та оптимізує процеси. Ця інтеграція дозволяє перейти від реактивного підходу, коли проблеми вирішуються після їх виникнення, до проактивного управління, коли система може прогнозувати збої [1, 2].



Рисунок 1. Візуальне представлення синергії

4. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ СТАЛОСТІ

Цифрові технології та системи штучного інтелекту активно застосовуються для досягнення сталості, зокрема для оптимізації ресурсів, підвищення енергоефективності, автоматизації процесів та покращення проектування.

Таблиця 1: Практичні застосування цифрових технологій

Напрямок	Технологія	Ключові переваги
Управління ресурсами та відходами	Цифрові двійники	Створюють симуляції використання матеріалів для уникнення надмірних замовлень. Понад 90% відходів припадає на демонтажні роботи, тому планування критично важливе.
Енергоефективність	ШІ + Цифрові двійники	Аналізують енергоспоживання, оптимізують водо- і теплоспоживання. Можуть скоротити споживання енергії системами HVAC на 23-39%, а освітлення — до 79%.

Продовження таблиці 1

Автоматизація та безпека	Робототехніка + ШІ	Робот Nadrian X (Рис. 2) укладає до 1,000 блоків на годину, що в 5 разів швидше за ручну працю. Використовує 3D CAD для зменшення відходів і спеціальний клей, що вдвічі міцніший за розчин.
--------------------------	--------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Джерело: складено автором

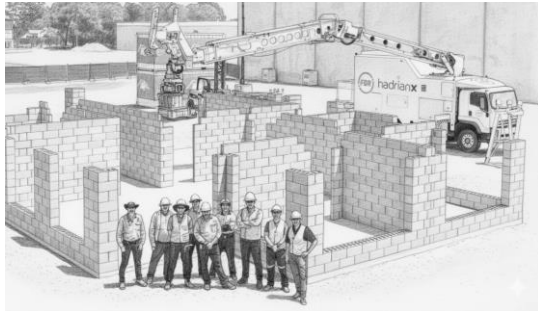


Рисунок 2. Робот Nadrian X в дії

Генеративний дизайн (GD), керований ШІ, є інноваційним підходом, що змінює парадигму проєктування. Це глибока синергія між людською креативністю та обчислювальною потужністю алгоритмів. На відміну від традиційного дизайну, де архітектор створює єдине рішення, генеративний дизайн дозволяє визначити цілі та параметри (наприклад, бажаний рівень природного освітлення, бюджет, енергоефективність), а потім алгоритм ШІ генерує тисячі оптимізованих рішень, що відповідають цим критеріям. Цей підхід дозволяє закладати критерії сталості вже на самому початку проєкту, що значно підвищує ефективність усього життєвого циклу будівлі [3]. Прикладом є офісний простір в Autodesk Technology Centre, Торонто, де алгоритми врахували вподобання 250 співробітників і згенерували понад десять тисяч можливих варіантів планування, що дозволило обрати найоптимальніший [4].

5. ВИКЛИКИ ТА БАР'ЄРИ

Впровадження інновацій у будівельну галузь стикається з низкою значних бар'єрів. Середній обсяг інвестицій великих підприємств у комплексні цифрові проєкти становить близько \$27.5 млн, що робить інновації недоступними для багатьох малих та середніх компаній. Інші ключові виклики, пов'язані з кадровими, культурними, регуляторними та технологічними аспектами, узагальнено у таблиці 2 [5].

Таблиця 2: Бар'єри та шляхи подолання цифровізації

Категорія	Виклики	Подолання
Фінансові та технологічні	Високі інвестиції, відсутність єдиних стандартів.	Державна підтримка, спільні інвестиційні проєкти, прийняття єдиних відкритих стандартів даних.
Кадрові та культурні	Нестача кваліфікованих спеціалістів, опір персоналу.	Запровадження програм навчання, співпраця з освітніми закладами, створення пілотних проєктів.
Регуляторні та правові	Невизначеність щодо прав власності на цифрові дані.	Розробка та імплементація відповідного законодавства.

Джерело: складено автором

В українському контексті цифровізація набуває додаткової стратегічної ваги, оскільки є ключовим елементом забезпечення прозорості та підзвітності процесів, що має вирішальне значення в умовах повоєнного відновлення. Прикладом успішного впровадження є Єдина державна електронна система у сфері будівництва (ЄДЕССБ), створена у 2019 році. Ця система дозволяє відстежувати документи та контролювати всі етапи будівництва в режимі реального часу. Вона надає відкритий доступ до даних, що робить її дієвим інструментом боротьби з корупцією. За перший квартал 2024 року до неї приєдналося понад 7,6 тис. нових учасників [6]. Нещодавно було створено програмний інтерфейс (API) для автоматизованої передачі даних про об'єкти незавершеного будівництва, що дозволяє приватним сервісам нерухомості надавати своїм користувачам перевірену інформацію про договори та права власності [7].

6. ВИСНОВКИ

Впровадження цифрових технологій та ШІ є ключовим для сталого розвитку будівельної галузі. Синергія BIM, ШІ, цифрових двійників та IoT формує екосистему прогностичного управління й відкриває нові можливості, зокрема через генеративний дизайн. Подолання фінансових, кадрових і регуляторних бар'єрів є необхідною умовою, а в Україні цифровізація відіграє стратегічну роль у прозорій та стійкій відбудові.

Список літератури

- [1] A complete guide to digital twins in construction. Dusty Robotics. URL: <https://www.dustyrobotics.com/articles/a-complete-guide-to-digital-twins-in-construction> (Дата звернення 20.09.2025 р.)
- [2] Nguyen T. D., Adhikari S. The role of BIM in integrating digital twin in building construction: *A Literature Review. Sustainability*. 2023. Т. 15, № 13. С. 10462. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151310462>.
- [3] Generative Design AI software. Autodesk: вебсайт. URL: <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design-ai-software> (Дата звернення 20.09.2025 р.)
- [4] 4 Examples of generative design in action. Archistar. URL: <https://www.archistar.ai/blog/4-examples-of-generative-design-in-action> (Дата звернення 20.09.2025 р.)
- [5] Kryvosheina.Y. What Is the Average Cost of Digital Transformation Projects? Svitla Systems. URL: <https://svitla.com/blog/average-cost-of-digital-transformation-projects/> (Дата звернення 20.09.2025 р.)
- [6] Прозоре будівництво: відзначили три роки цифрової трансформації та роботи е-системи будівництва. TAPAS. URL: <https://tapas.org.ua/all-uk/news-uk/prozore-budivnytstvo-vidznachyly-try-roky-tyfrovoyi-transformatsii-ta-roboty-e-systemy-budivnytstva/> (Дата звернення 20.09.2025 р.)
- [7] Створено API для передачі відомостей про ОНБ та МОНИ для сервісів нерухомості. Портал Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва. URL: <https://e-construction.gov.ua/stvoreno-api-dlja-peredachi-vidomoste-pro-onb-ta-moni-dlja-servisiv-neruhomosti> (Дата звернення 20.09.2025 р.)

Робота виконана під керівництвом д-р. екон. наук, проф. кафедри МБ Ірини Івахненко.