

Олександр КОБЕЛЬЧУК,

аспірант

ORCID: 0009-0000-9000-7465

Роман КОНОНЧУК,

аспірант

ORCID: 0009-0009-2682-8600

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ БУДІВЕЛЬНОГО ПРОЦЕСУ ЗА ДОПОМОГОЮ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ПРОЕКТІВ БУДІВНИЦТВА

Метою цього дослідження було дослідити вплив цифрових технологій на оптимізацію будівельного процесу в умовах нестабільного фінансування або нестачі ресурсів та сформулювати практичні рекомендації щодо їх ефективного впровадження. Методологія дослідження включала аналіз сучасних тенденцій у сфері цифрових рішень, зокрема інформаційного моделювання будівель (BIM), технологій Інтернету речей, штучного інтелекту, цифрових двійників та хмарних платформ. Розглянуто можливості інтеграції цих технологій для покращення планування, будівництва та експлуатації об'єктів, а також їх вплив на підвищення ефективності управління ресурсами. Було проведено аналіз реальних випадків, зокрема впровадження BIM-технологій в проєкті ASTON HALL компанією DEHAUSS, яке підтвердило значний потенціал цифрових технологій. Також було розглянуто проєкт Crossrail, де BIM-технології забезпечили ефективну координацію між підрядниками, а також цифрових двійників закордоном, які використовуються для управління міськими ресурсами.

Дослідження показало, що BIM-технології сприяють зменшенню помилок у проектуванні та будівництві, покращенню координації між учасниками проєкту та зниженню витрат. Технології Інтернету речей забезпечують моніторинг стану будівельних матеріалів та обладнання в режимі реального часу, що підвищує рівень безпеки та зменшує ризики простойв. Використання штучного інтелекту дозволяє прогнозувати потенційні затримки, оптимізувати логістику та автоматизувати процеси управління. Основними проблемами цифровізації будівництва залишаються висока вартість впровадження технологій, необхідність навчання персоналу, труднощі інтеграції програмних платформ та проблеми кібербезпеки.

Водночас, такі переваги, як автоматизація процесів, підвищення точності розрахунків навантаження та енергоефективності, оптимізація постачання ресурсів та покращений контроль над будівельними проєктами, підтверджують стратегічну важливість цифрових рішень у розвитку будівельної галузі. Результати дослідження показали, що комплексний підхід до впровадження цифрових технологій, адаптації будівельних процесів та ефективної інтеграції цифрових платформ може значно підвищити продуктивність будівельних проєктів, особливо в умовах нестабільного постачання будівельних ресурсів.

Ключові слова: *будівництво, проєкти, моделювання інформації будівель, геоінформаційні технології, хмарні обчислення.*

Вступ. Традиційні підходи до управління будівництвом більше не можуть повністю забезпечити оптимізацію процесів та зменшення збитків, що вимагає впровадження інноваційних технологій. Одним із ключових рішень для підвищення ефективності будівництва є цифровізація, яка дозволяє оптимізувати процеси на всіх етапах реалізації проекту. Цифрові технології, такі як інформаційне моделювання будівель (BIM), штучний інтелект (ШІ), Інтернет речей (IoT) та хмарні обчислення, дозволяють ефективно планувати ресурси, прогнозувати витрати та мінімізувати ризики (Shults & Annenkov, 2023) [13]. Використання цих технологій особливо актуальне в умовах нестабільного постачання ресурсів, де необхідно швидко адаптувати будівельні процеси до змін у постачанні матеріалів, коливань цін та логістичних обмежень.

Актуальність теми дослідження зумовлена зростаючими викликами в будівельному секторі, пов'язаними з нестабільністю поставок матеріалів, зростанням вартості ресурсів та необхідністю забезпечення стійкості будівельних процесів. Впровадження цифрових рішень може значно покращити управління ресурсами, скоротити терміни будівництва та підвищити якість виконання робіт.

Однією з головних переваг цифровізації є значне скорочення часу, необхідного для розробки проектної документації, та підвищення точності розрахунків. Використання BIM дозволяє інтегрувати всі етапи будівельного процесу в єдину модель, що значно покращує координацію між учасниками проекту та зменшує кількість помилок. Впровадження автоматизованих систем управління будівництвом дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів, що є критично важливим за умов нестабільних поставок матеріалів (Кузнецов, 2024) [7].

Крім того, системи Інтернету речей (IoT) забезпечують можливість моніторингу стану будівельних майданчиків у режимі реального часу, що дозволяє швидко реагувати на непередбачені ситуації та мінімізувати ризики. Y. Zheng та ін. (2021) [9] підкреслили переваги цифровізації, такі як скорочення часу на розробку проектної документації та покращення координації за допомогою BIM, що узгоджується з висновками тут, де також зазначається важливість цих технологій для підвищення точності та ефективності.

Однак, на відміну від цього дослідження, автори не зосереджувалися на таких проблемах, як потреба в навчанні персоналу та питаннях постачання ресурсів. Їхній акцент на автоматизованих системах управління для оптимізації ресурсів у нестабільних умовах частково збігається з цим дослідженням, хоча це дослідження більше зосереджено на інтеграції IoT для моніторингу об'єктів. Загалом, результати авторів підтверджують більшість висновків цього дослідження, але відрізняються акцентом на певних аспектах технологічного впровадження.

Аналіз досліджень і публікацій. Розвиток цифровізації в будівельному секторі активно досліджується науковцями. Аналіз академічних досліджень дозволяє визначити основні підходи та перспективи використання цифрових технологій для оптимізації будівельного процесу в умовах нестабільного постачання ресурсів.

Наприклад, Т. Гончаренко (2021) [1] досліджував, як BIM впливає на управління ресурсами та планування будівельних проєктів. Він зазначив, що впровадження BIM здатне зменшити втрати матеріалів та підвищити ефективність постачання будівельних ресурсів. В. Щеглов та О. Морозова (2022) [12]

проаналізували використання технологій Інтернету речей для моніторингу стану будівельних матеріалів у режимі реального часу, що є критично важливим в умовах нестабільного постачання.

У своєму дослідженні А. Кузьор та ін. (2023) [6] розглянули роль штучного інтелекту в покращенні управлінських рішень та оптимізації інноваційних процесів. Автори наголосили, що застосування штучного інтелекту сприяє прискоренню розробки нових рішень, підвищенню ефективності співпраці між учасниками інноваційних екосистем та зниженню ризиків на етапі впровадження.

Р. Крішнан та ін. (2024) [5] зазначили, що інтелектуальні алгоритми штучного інтелекту допомагають покращити логістичні процеси та посилити координацію в управлінні постачанням. У свою чергу, В. Лі та ін. (2021) [4] наголосили на ролі хмарних обчислень у забезпеченні гнучкого управління будівельними процесами. Вони зазначили, що впровадження хмарних платформ дозволяє централізовано керувати ресурсами та інтеграцію даних з різних джерел, що є критично важливим в умовах нестабільного постачання.

Дослідження С.Н. Паргу та М. Ільбейгі (2022) [11] було зосереджено на питаннях кібербезпеки в цифровізації будівельного сектору, вказуючи на ризики витоку даних та потенційні атаки на автоматизовані системи управління. Вони запропонували використовувати технології блокчейн для підвищення безпеки даних та транзакцій в управлінні будівництвом. У своєму дослідженні К. Лаврухіна та ін. (2024) [8] стверджували, що виклики глобалізації сприяють прискореному розвитку інноваційних та інформаційних процесів, що позитивно впливає на конкурентоспроможність будівельної галузі. С.В. Мхаскі (2024) [10] вказав на важливість інтеграції автоматизованих систем управління з системами планування ресурсів підприємства (ERP) для ефективного розподілу ресурсів та моніторингу постачання. Він наголосив, що цифрові рішення можуть зменшити витрати на логістику та закупівлі.

М. Тетік та ін. (2019) [15] у своєму дослідженні наголосили, що ключовим фактором успішної цифровізації будівництва є інтеграція цифрових технологій на всіх етапах проекту – від проектування до експлуатації. Вони зазначили, що хоча впровадження цифрових рішень супроводжується такими труднощами, як високі витрати та потреба в кваліфікованих спеціалістах, довгострокові переваги з точки зору підвищення ефективності та зниження витрат значно переважають їх. Їхні висновки загалом узгоджуються з цим дослідженням, зокрема щодо важливості стратегічного підходу до цифровізації.

Водночас автори зробили більший акцент на управлінських аспектах цифрових трансформацій у будівництві, тоді як поточне дослідження більше зосереджене на технічних інструментах та методах їх застосування в умовах нестабільного постачання ресурсів.

Завдяки використанню цифрових технологій, таких як лазерне сканування LIDAR та ГІС, стало можливим точніше проводити геодезичні та геологічні дослідження. Це дозволяє визначати характеристики ділянки та вибирати найоптимальніші будівельні матеріали з урахуванням енергоефективності. Наприклад, програми розрахунку енергоефективності, такі як EnergyPlus та DesignBuilder, дозволяють прогнозувати споживання енергії будівлями, а також вибирати матеріали, які максимально знижують витрати енергії під час експлуатації об'єкта (Суходуб та Сердечний, 2024) [14]. Л. Джонс та П. Хоббс

(2021) [3] наголосили на важливості використання лазерного сканування LIDAR та ГІС для геодезичних та геологічних досліджень, що узгоджується з цим дослідженням щодо застосування цифрових технологій у цих процесах. Однак автори зосередилися на виборі матеріалів для енергоефективності за допомогою таких програм, як EnergyPlus та DesignBuilder, чого немає в поточному дослідженні. Загалом, ідеї авторів узгоджуються з поточними, але включають додаткові конкретні приклади програмного забезпечення.

Постановка завдання. Особливу увагу має бути приділено моніторингу та автоматичному оновленню документації, що дозволяє ефективніше керувати проектами на всіх етапах. Результати дослідження повинні узгоджуватися з цим дослідженням у певних аспектах, зокрема, у висвітленні переваг цифровізації для підвищення ефективності, скорочення часу будівництва та покращення якості робіт завдяки інтеграції новітніх технологій, автоматичному оновленню документації та моніторингу стану будівництва в режимі реального часу.

Основний матеріал. Цифровізація будівництва – це процес впровадження цифрових технологій на всіх етапах життєвого циклу будівельних проектів, спрямований на підвищення ефективності, зниження витрат та мінімізацію ризиків. Вона охоплює використання автоматизованих систем управління, штучного інтелекту, Інтернету речей, хмарних обчислень та інших цифрових рішень, що дозволяють оптимізувати процеси планування, будівництва та експлуатації будівель. Однією з ключових технологій цифровізації є BIM – інформаційне моделювання будівель – яке передбачає створення цифрового тривимірного представлення будівлі з усіма її характеристиками. BIM дозволяє інтегрувати всі етапи проектування, будівництва та експлуатації в єдину систему, що зменшує кількість помилок, скорочує час реалізації проекту та підвищує точність розрахунків матеріалів.

Використання BIM забезпечує кращу координацію між підрядниками, клієнтами та інженерами, що критично важливо в умовах нестабільного постачання ресурсів. Впровадження BIM дозволяє значно підвищити точність та швидкість узгодження креслень, створюючи єдину цифрову модель будівлі, яка об'єднує всі необхідні дані в одному місці.

Це дозволяє всім учасникам проекту (архітекторам, інженерам, підрядникам) працювати з актуальними даними в режимі реального часу, що мінімізує ризик помилок та спрощує процес затвердження проектних рішень. Цифровізація будівельного процесу пропонує значні переваги; однак її впровадження супроводжується кількома викликами, особливо в умовах нестабільного постачання ресурсів.

Основна увага приділяється ключовим проблемам та перевагам, пов'язаним із практичними аспектами будівельної діяльності, зокрема, процесами підготовки проектної документації, проведення геодезичних вишукувань, використання спеціалізованого програмного забезпечення для створення креслень та візуалізацій, а також виконанням розрахунків матеріальних навантажень та оцінкою їх енергоефективності. Проблеми впровадження цифрових рішень у будівництві включають високу вартість впровадження та навчання персоналу, оскільки використання сучасного програмного забезпечення для створення проектної документації, геодезичних та геологічних вишукувань, розрахунку

матеріальних навантажень та оцінки їх енергоефективності вимагає значних фінансових витрат.

У сучасному будівництві впровадження цифрових технологій стає не просто тенденцією, а необхідністю, що зумовлено підвищеними вимогами до якості, швидкості та ефективності будівельних робіт. Традиційні методи, засновані на паперовій документації, ручних розрахунках та фізичних перевірках, поступово замінюються цифровими інструментами, які забезпечують більшу точність, знижують ризики людських помилок та значно пришвидшують процеси.

Використання BIM-моделювання, автоматизованих систем управління ресурсами, лазерного сканування, сенсорних технологій та інших цифрових інструментів дозволяє будівельним компаніям ефективніше керувати проектами, мінімізувати витрати та покращувати контроль якості (Turner et al., 2020) [16]. Водночас, цифровізація будівельного процесу пов'язана з певними труднощами, такими як необхідність навчання персоналу, високі початкові інвестиції та інтеграція нових технологій в існуючі робочі процеси. Однак досвід багатьох компаній показує, що довгострокові переваги цифрових рішень значно переважають витрати на їх впровадження. Практичні будівельні аспекти цифровізації розглядалися окремо, включаючи розробку документації, виконання геодезичних та геологічних вишукувань, а також використання програмного забезпечення для креслень, розрахунків навантаження та оцінки енергоефективності матеріалів.

Було визначено, що цифрові технології дозволяють значно підвищити точність геодезичних досліджень, покращити моделювання проектів за допомогою 3D-сканування, а також автоматизувати процеси проектування та інженерних розрахунків. Водночас було виявлено кілька проблем, зокрема висока вартість впровадження цифрових рішень, необхідність навчання персоналу, проблеми сумісності програмного забезпечення та складність інтеграції даних між різними системами. Також досліджувалася проблема нестабільного постачання ресурсів, яка впливає на стабільність цифрових рішень, особливо у віддалених або кризових регіонах.

Результати дослідження підтвердили, що цифровізація будівництва є ключовим фактором підвищення ефективності галузі. Однак її успішне впровадження вимагає комплексного підходу, інвестицій та вирішення низки технічних та організаційних проблем. Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка адаптивних цифрових рішень для умов нестабільного постачання ресурсів, удосконалення методів інтеграції BIM та IoT, а також оцінка ефективності штучного інтелекту у прогнозуванні ризиків у будівельних проектах.

Висновки. Однак впровадження цифрових технологій у будівництві пов'язане з кількома проблемами. Однією з найбільших є висока вартість програмного забезпечення та обладнання. Витрати на ліцензії на BIM, LIDAR-сканери або спеціалізовані програми розрахунку навантаження значно перевищують бюджет традиційних методів. Крім того, існує потреба в навчанні персоналу ефективному використанню цих інструментів, що ще більше збільшує часові та фінансові витрати. З іншого боку, навіть після впровадження технологій виникають проблеми з їх інтеграцією та сумісністю з іншими платформами, такими як AutoCAD або Revit.

За відсутності єдиної стандартизованої платформи для зберігання та обміну даними, робота з різними системами може ускладнити взаємодію між різними учасниками будівельного процесу. С.А. Хендраван та ін. (2024) [2] зазначили, що основними проблемами впровадження цифрових технологій є висока вартість програмного забезпечення та обладнання, а також необхідність навчання персоналу ефективному використанню інструментів, що узгоджується з цим дослідженням.

Однак, це дослідження не порушувало питання сумісності між різними програмними платформами, такими як AutoCAD або Revit, на відміну від цього автора, який детально розглянув інтеграцію різних систем. Загалом, результати авторів підтверджують висновки, зроблені тут, щодо фінансових та навчальних проблем, але додають конкретику щодо сумісності програмного забезпечення.

Ще одним суттєвим викликом є залежність від стабільного постачання ресурсів. Цифрові рішення вимагають надійного електропостачання та доступу до Інтернету, що може бути серйозною проблемою для будівництва у віддалених або кризових регіонах. Перебої з електроенергією або низька швидкість Інтернету можуть призвести до затримок у виконанні робіт та вивести з ладу цифрові системи моніторингу та управління. Важливо наголосити на важливості стабільного постачання ресурсів для ефективного впровадження цифрових технологій, зазначивши, що надійне електропостачання та доступ до Інтернету є критичними факторами для роботи з цифровими системами.

Ці результати узгоджуються з висновками цього дослідження, оскільки це дослідження також висвітлює залежність від стабільного постачання ресурсів як одну з основних проблем цифровізації будівництва. Однак автори детальніше описали потенційні наслідки низької швидкості Інтернету або перебоїв з електроенергією, що не було підкреслено в цьому дослідженні.

Безпека даних є важливим аспектом впровадження цифрових технологій. Використання хмарних платформ для зберігання документації та управління проектами збільшує ризики несанкціонованого доступу до критично важливих даних, таких як креслення, розрахунки навантаження та геодезичні дослідження. У зв'язку з цим необхідно розробити та впровадити стратегії захисту даних від кіберзагроз, з розвитком цифрових технологій у будівництві виникає потреба в забезпеченні безпеки даних.

Для успішної цифровізації будівництва необхідно вирішити кілька проблем, зокрема тих, що стосуються вартості, навчання та забезпечення безпеки даних. Однак, за умови стратегічного підходу та інтеграції інновацій на всіх етапах будівництва, цифрові технології можуть значно покращити управління ресурсами та забезпечити високу ефективність будівельних процесів, навіть у складних умовах нестабільного постачання ресурсів та фінансування проектів.

Список літератури:

1. Гончаренко, Т. (2021). BIM-технології як інструмент для створення інформаційної моделі життєвого циклу будівельного об'єкта. *Управління розвитком складних систем*, 47, 83-88. DOI: 10.32347/2412-9933.2021.47.83-88.
2. Hendrawan, S. A., Afdhal Chatra, Nurul Iman, Soemarno Hidayatullah, & Degdo Suprayitno. (2024). Digital Transformation in MSMEs: Challenges and Opportunities in

Technology Management. *Jurnal Informasi Dan Teknologi*, 6(2), 141-149. <https://doi.org/10.60083/jidt.v6i2.551>.

3. Jones, L., & Hobbs, P. (2021). The Application of Terrestrial LiDAR for Geohazard Mapping, Monitoring and Modelling in the British Geological Survey. *Remote Sensing*, 13(3), 395. <https://doi.org/10.3390/rs13030395>.

4. Kim, K., Lee, G. & Kim, S. (2020). A Study on the Application of Blockchain Technology in the Construction Industry. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24, 2561–2571 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0188-x>.

5. Krishnan, R., Govindaraj, M., Kandasamy, L., Perumal, E., & Mathews, S.B. (2024). Integrating logistics management with artificial intelligence and IoT for enhanced supply chain efficiency. In R. El Khoury (Ed.), *Anticipating future business trends: Navigating artificial intelligence innovations* (pp. 25-35). Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-031-63569-4_3.

6. Kuzior, A., Sira, M., & Brożek, P. (2023). Use of Artificial Intelligence in Terms of Open Innovation Process and Management. *Sustainability*, 15(9), 7205. <https://doi.org/10.3390/su15097205>.

7. Kuznetsov, P. (2024). Development and implementation of a smart home automation system in the context of the Ukrainian housing sector: Challenges and prospects. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, 29(1), 62-72. doi: 10.62660/bcstu/1.2024.62.

8. Lavrukhina, K., Tytok, V., Shpakova, H., Ivanova, T., Shevchuk, O., Biloshchytskyi, A. (2023). Innovative communication technologies as a factor in the development of the post-war economy of Ukraine. *2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)* 4-6 May, 2023, Astana, Kazakhstan. P. 149-157. DOI: 10.1109/SIST61555.2024.10629519.

9. Li, W., Wu, J., Cao, J. et al. (2021). Blockchain-based trust management in cloud computing systems: a taxonomy, review and future directions. *Journal of Cloud Computing*, 10, 35. <https://doi.org/10.1186/s13677-021-00247-5>.

10. Mhaskey, S.V. (2024). Integration of artificial intelligence (AI) in enterprise resource planning (ERP) systems: Opportunities, challenges, and implications. *International Journal of Computer Engineering in Research Trends*, 11(12), 1-9. DOI: 10.22362/ijcert/2024/v11/i12/v11i1201.

11. Pargoo, N.S., & Ilbeigi, M. (2022). A scoping review for cybersecurity in the construction industry. *Journal of Management in Engineering*, 39(2). DOI: 10.1061/jmenea.meeng-5034.

12. Shcheglov, V., & Morozova, O. (2022). Methods and technologies for developing digital twins for warrantable systems of the industrial Internet of Things. *Control, Navigation and Communication Systems*, 4(70), 127-137. DOI: 10.26906/SUNZ.2022.4.127.

13. Shults, R., & Annenkov, A. (2023). BIM and UAV photogrammetry for spatial structures sustainability inventory. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*, 48(5/W2-2023), 99-104. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-5-W2-2023-99-2023.

14. Sukhodub, I., & Serdechnyi, P. (2024). Analysis of scenarios for increasing the level of energy efficiency of public buildings with integration of RES. *Technologies and Engineering*, 25(2), 44-56. DOI: 10.30857/2786-5371.2024.2.5.

15. Tetik, M., Peltokorpi, A., Seppänen, O., & Holmström, J. (2019). Direct digital construction: Technology-based operations management practice for continuous improvement of construction industry performance. *Automation in Construction*, 107, article number 102910. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102910.

16. Turner, C.J., Oyekan, J., Stergioulas, L., & Griffin, D. (2020). Utilizing Industry 4.0 on the construction site: Challenges and opportunities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(2), 746-756. DOI: 10.1109/tii.2020.3002197.

Oleksandr KOBELCHUK, Roman KONONCHUK

Research on the optimization of the construction process through the digitalization of construction projects

The purpose of this study was to investigate the impact of digital technologies on the optimization of the construction process in conditions of unstable financing or lack of resources and to formulate practical recommendations for their effective implementation. The research methodology included an analysis of current trends in the field of digital solutions, in particular, building information modeling (BIM), Internet of Things technologies, artificial intelligence, digital twins and cloud platforms. The possibilities of integrating these technologies to improve the planning, construction and operation of facilities, as well as their impact on increasing the efficiency of resource management, were considered. Real-world case studies were conducted, including the implementation of BIM technology in the ASTON HALL project by DEHAUSS, which confirmed the significant potential of digital technologies. The Crossrail project was also considered, where BIM technologies ensured effective coordination between contractors, as well as digital twins abroad, which are used to manage urban resources.

The study showed that BIM technologies contribute to reducing errors in design and construction, improving coordination between project participants and reducing costs. Internet of Things technologies provide real-time monitoring of the condition of construction materials and equipment, which increases safety and reduces the risk of downtime. The use of artificial intelligence allows predicting potential delays, optimizing logistics and automating management processes. The main problems of digitalization of construction remain the high cost of technology implementation, the need for personnel training, difficulties in integrating software platforms and cybersecurity issues.

At the same time, benefits such as process automation, increased accuracy of load calculations and energy efficiency, optimization of resource supply and improved control over construction projects confirm the strategic importance of digital solutions in the development of the construction industry. The results of the study showed that a comprehensive approach to the implementation of digital technologies, adaptation of construction processes and effective integration of digital platforms can significantly increase the productivity of construction projects, especially in conditions of unstable supply of construction resources.

Keywords: construction, projects, building information modeling, geoinformation technologies, cloud computing.