

DOI: 10.32347/2786-7269.2025.13.618-630

УДК 528.7:69.001.7

Томашевський В.В.,

tomashevskiy_vv-2024@knuba.edu.ua, ORCID: 0009-0000-3866-8821,

Київський національний університет будівництва і архітектури

СТВОРЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

В епоху цифрової трансформації будівельна галузь активно впроваджує інноваційні підходи для підвищення ефективності, стійкості та безпеки об'єктів протягом їхнього життєвого циклу. Концепція цифрових двійників (ЦД) є одним із ключових драйверів цієї трансформації, пропонуючи динамічну віртуальну репрезентацію фізичної будівлі чи споруди, інтегровану з даними реального часу. У статті проаналізовано фундаментальну роль геоінформаційних методів та систем (ГІС) у процесах створення, оновлення та використання цифрових двійників будівель. Детально розглянуто сучасні методи збору геопросторових даних, зокрема наземне та мобільне лазерне сканування (НЛС, МЛС), фотограмметрію (включаючи використання БПЛА), як основні джерела отримання точної 3D геометрії існуючих об'єктів. Висвітлено важливість інтеграції ГІС та BIM для створення комплексних цифрових двійників, що поєднують детальну внутрішню модель об'єкта з його зовнішнім просторовим контекстом. Розглянуто інтеграцію даних з IoT-сенсорів для моніторингу стану конструкцій та параметрів середовища в реальному часі. Проаналізовано міжнародний досвід впровадження ЦД у будівництві (Велика Британія, Сінгапур, Німеччина). Визначено ключові переваги використання ЦД на різних етапах життєвого циклу – від проектування до експлуатації та демонтажу. Окреслено основні виклики та перспективні напрями подальших досліджень, включаючи автоматизацію процесів, інтероперабельність даних, масштабування до рівня міських ЦД, застосування штучного інтелекту та забезпечення кібербезпеки. Стаття доводить, що геоінформаційні методи є невід'ємною технологічною основою для реалізації повного потенціалу цифрових двійників у будівельній галузі.

Ключові слова: цифровий двійник; будівлі та споруди; геоінформаційні системи (ГІС); лазерне сканування; фотограмметрія; BIM; управління життєвим циклом; Інтернет речей (IoT); Scan-to-BIM.

Вступ

Галузь архітектури, інженерії та будівництва (АЕС - Architecture, Engineering, Construction) є однією з найбільших та найважливіших у світовій економіці, проте традиційно характеризується відносно низьким рівнем цифровізації, фрагментацією процесів та інформації, що призводить до перевитрат коштів, зривів термінів та неефективного управління об'єктами на етапі експлуатації [1]. Сучасні виклики, такі як зростаюча складність проєктів, вимоги до сталого розвитку, енергоефективності та безпеки, потребують кардинально нових підходів до управління всім життєвим циклом будівель та споруд – від концепції до демонтажу.

Одним з найбільш перспективних рішень, що відповідають цим викликам, є концепція цифрових двійників (Digital Twins - DTs). Запозичена з аерокосмічної та промислової індустрії [2], вона передбачає створення динамічної, високоточної віртуальної моделі фізичного об'єкта або системи, яка постійно оновлюється даними з реального світу, найчастіше за допомогою сенсорів та інших джерел даних [3, 4]. Цифровий двійник будівлі (Building Digital Twin - BDT) – це не просто статична 3D модель; це інтегрована система, що поєднує геометрію, семантичну інформацію, дані реального часу та аналітичні інструменти, дозволяючи моделювати, аналізувати та оптимізувати процеси протягом усього життєвого циклу будівлі [5].

Створення точного та функціонального цифрового двійника, особливо для вже існуючих будівель, неможливе без застосування сучасних геоінформаційних технологій. Саме вони забезпечують збір високоточних просторових даних про геометрію об'єкта та його оточення, їх обробку, інтеграцію з іншими даними та візуалізацію. Геоінформаційні системи (ГІС), технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), зокрема лазерне сканування та фотограмметрія, методи обробки та аналізу просторових даних формують технологічний фундамент для побудови цифрових двійників в АЕС галузі.

Метою даної статті є комплексний аналіз ролі та застосування геоінформаційних методів для створення та використання цифрових двійників будівель та споруд на різних етапах їхнього життєвого циклу, та розгляд варіантів майбутніх досліджень.

Завдання дослідження:

- Розкрити сутність концепції цифрового двійника будівлі, його компонентів та функціональних можливостей.
- Детально проаналізувати ключові геоінформаційні методи збору первинних даних (лазерне сканування, фотограмметрія) для створення ЦД.
- Розглянути процеси обробки геопросторових даних та їх інтеграції з BIM та IoT даними.

- Оцінити поточний стан та перспективи використання ЦД для моніторингу та управління життєвим циклом будівель.
- Проаналізувати міжнародний досвід та стандартизацію в цій сфері.
- Визначити основні проблеми та окреслити перспективні напрями подальших наукових досліджень.

Об'єкт дослідження: сучасні методи створення та використання цифрових двійників та міжнародний досвід їх використання.

Предмет дослідження: пошук перспектив та подальших можливостей досліджень геоінформаційних методів створення та використання цифрових двійників будівель та споруд

Стаття структурована наступним чином: спочатку надається огляд літератури щодо концепції ЦД та пов'язаних технологій. Розглядаються геоінформаційні технології, що лежать в основі. Далі аналізується поточний стан та перспективи використання ЦД. Наприкінці обговорюються майбутні напрями досліджень та формулюються висновки.

Огляд літератури

Концепція цифрового двійника бере свій початок від програми NASA Apollo, де використовувалися фізичні дублікати космічних апаратів для моделювання ситуацій на Землі. Термін "Digital Twin" був формалізований Майклом Гривзом у 2002 році стосовно управління життєвим циклом продукту (PLM) [2]. Загальне визначення описує ЦД як систему, що складається з трьох частин: фізичного об'єкта в реальному просторі, віртуального об'єкта у віртуальному просторі та зв'язків даних і інформації, що їх поєднують [3].

В контексті АЕС галузі, визначення ЦД часто пов'язують з еволюцією Інформаційного Моделювання Будівель (BIM). Якщо BIM здебільшого фокусується на статичній інформації для проектування та будівництва, то ЦД додає динамічний компонент, інтегруючи дані реального часу з фізичного активу [5, 6]. Деякі дослідники пропонують багаторівневі моделі ЦД, що включають фізичний актив, віртуальну модель, сервіси (аналітика, симуляція), дані (що пов'язують фізичний і віртуальний світи) та з'єднання [4, 7].

Статичний цифровий двійник будівлі представляє віртуальну модель об'єкта в певний момент часу [3]. Він містить детальну 3D-модель, інформацію про геометрію, матеріали, конструкції та інженерні системи. Основним призначенням такого близнюка є візуалізація, виявлення конфліктів, планування та створення інформаційної моделі будівлі (BIM).

З іншого боку, динамічний цифровий двійник — це жива віртуальна копія будівлі, яка постійно оновлюється даними з реального об'єкта в режимі реального часу [27]. Він використовує інформацію від датчиків, пристроїв Інтернету речей і систем управління будівлями для відображення поточного

стану, споживання енергії, умов навколишнього середовища та інших параметрів. Такий двійник використовується для моніторингу, прогнозування, оптимізації експлуатації будівлі, підвищення комфорту та безпеки, дозволяє моделювати та приймати обґрунтовані рішення на основі актуальних даних.

Використання ЦД охоплює весь життєвий цикл будівлі:

- **Проектування:** Покращена візуалізація, виявлення колізій на ранніх стадіях, симуляція різних сценаріїв (наприклад, освітлення, енергоспоживання) [8].

- **Будівництво:** Моніторинг прогресу робіт шляхом порівняння стану "як будується" (отриманого скануванням) з проектною BIM-моделлю, контроль якості, управління логістикою [9].

- **Експлуатація та обслуговування:** Це найперспективніша сфера застосування ЦД. Моніторинг стану конструкцій та інженерних систем (за допомогою IoT сенсорів, інтегрованих в ЦД), предиктивне обслуговування, оптимізація енергоспоживання, управління простором та активами, планування ремонтів [10, 11].

- **Реконструкція та демонтаж:** Точне документування стану "як є" для планування робіт, управління відходами [12].

Ключовим етапом є створення точної віртуальної моделі, особливо для існуючих будівель. Традиційні методи обмірів є трудомісткими та не завжди забезпечують необхідну повноту даних. Сучасні геоінформаційні методи, такі як лазерне сканування та фотограмметрія, стали де-факто стандартом для швидкого та точного збору 3D даних [13, 14]. Лазерне сканування забезпечує високу геометричну точність, тоді як фотограмметрія дозволяє отримувати фотореалістичні текстури [15].

В основі методу лежить випромінювання лазерного імпульсу та точне вимірювання часу, необхідного для його повернення після відбиття від поверхні об'єкта. Цей час, у поєднанні зі швидкістю світла, дозволяє з високою точністю визначити відстань до точки відбиття. Процес сканування відбувається дуже швидко, генеруючи мільйони окремих вимірювань, які утворюють так звану хмару точок, що є дискретним представленням поверхні об'єкта [13].

Повітряне лазерне сканування [3] використовується для збору даних з повітряних платформ, таких як літаки та гелікоптери, і застосовується переважно для великомасштабного картографування. Основною метою ПЛС (ALS) є створення точних цифрових моделей рельєфу (DTM) та цифрових моделей місцевості (DTM), а також отримання інформації про рослинність, інфраструктуру та інші елементи земної поверхні. Системи ПЛС зазвичай включають в себе високоточні системи глобального позиціонування (GPS) та інерціальні навігаційні системи (INS) для точного визначення положення та

орієнтації сканера в момент кожного вимірювання. Це дозволяє прив'язувати отримані точки до географічної системи координат.

Наземне лазерне сканування [3], на відміну від повітряного, здійснюється з наземних станцій. Сканер встановлюється на штативі або іншій стабільній основі і сканує об'єкти, що знаходяться в його полі зору. Основною перевагою НЛС (TLS) є можливість отримання надзвичайно детальних 3D-моделей з високою щільністю точок. Це робить наземне сканування незамінним інструментом у таких галузях, як архітектура та будівництво, промисловість, культурна спадщина, та гірнича справа (моніторинг кар'єрів та шахт). Наземні сканери можуть бути стаціонарними або мобільними, що розширює їхні можливості застосування.



Рис. 1 Хмара точок (геоінформаційна основа)

Інтеграція даних є ще одним викликом. BIM (часто у форматі IFC - Industry Foundation Classes) слугує семантичним ядром ЦД, надаючи інформацію про об'єкти та їх властивості [6]. ГІС доповнює BIM, надаючи геопросторовий контекст, можливість аналізу взаємозв'язків з оточенням та інструменти для управління великими територіями чи кампусами [16, 17].

Інтеграція даних з IoT сенсорів вимагає стандартизованих протоколів та платформ для обробки потоків даних реального часу [11, 18].

Міжнародні ініціативи, такі як "Digital Built Britain" [19] та "Virtual Singapore" [20], демонструють стратегічне бачення та практичне впровадження ЦД на національному та міському рівнях, підкреслюючи важливість стандартів (наприклад, Принципи Gemini [21]) та інтероперабельності даних. Розробляються також міжнародні стандарти, наприклад, в рамках ISO (зокрема, ISO 23247 - Digital Twin framework for manufacturing) [22], які можуть бути адаптовані і для будівельної галузі.

Аналіз: Сучасний стан та перспективи використання ЦД в управлінні життєвим циклом будівель

Застосування цифрових двійників, створених за допомогою геоінформаційних методів, надає значні переваги на всіх етапах життєвого циклу будівлі.

- **Проектування та будівництво:**

- Точне проектування реконструкцій: Лазерне сканування існуючої будівлі створює точну модель "як є" (as-built/as-is), що є основою для проектування реконструкції чи модернізації, мінімізуючи ризики колізій та непередбачених робіт [12].

- Контроль якості та прогресу будівництва: Регулярне сканування будівельного майданчика дозволяє порівнювати фактичний стан з проектною BIM-моделлю, виявляти відхилення, контролювати обсяги виконаних робіт та оновлювати виконавчу документацію [9].

- **Експлуатація та обслуговування:**

- Моніторинг стану конструкцій (SHM): Інтеграція даних з геодезичних вимірювань, лазерного сканування (для виявлення деформацій) та датчиків (вібрації, нахилу) в ЦД дозволяє відстежувати стан несучих конструкцій та завчасно виявляти потенційні проблеми [10].

- Оптимізація експлуатації інженерних систем: ЦД, що інтегрує BIM-модель інженерних мереж (ОВіК, електрика, водопостачання) та дані з IoT-сенсорів (температура, тиск, витрати), дозволяє аналізувати роботу систем, оптимізувати енергоспоживання, прогнозувати відмови та планувати технічне обслуговування (предиктивне обслуговування) [11, 24].

- Управління простором та активами: ЦД надає актуальну інформацію про планування приміщень, їх використання (за даними датчиків присутності), розташування активів (меблі, обладнання), що спрощує інвентаризацію та управління нерухомістю.

- Підвищення безпеки: Моделювання сценаріїв надзвичайних ситуацій (пожежа, затоплення) на базі ЦД, аналіз шляхів евакуації, інтеграція з системами контролю доступу та відеоспостереження [28].

- **Міжнародний досвід:**

Огляд міжнародного досвіду створення та використання цифрових двійників будівель та споруд, створених за допомогою лазерного сканування, демонструє значний прогрес у цій галузі та широкі можливості застосування цієї технології. Лазерне сканування, завдяки своїй високій точності та деталізації, стало незамінним інструментом для створення точних цифрових копій реальних об'єктів, які використовуються на різних етапах життєвого циклу будівлі – від проектування до експлуатації та знесення.

- Велика Британія: Програма "Digital Built Britain" та Центр цифрового будівництва Британії (CDBB) активно просувають використання ЦД. Принципи Gemini [21] закладають основу для створення національного цифрового двійника інфраструктури. Лазерне сканування та BIM є стандартними вимогами для багатьох державних проєктів.

- Сінгапур: Проєкт "Virtual Singapore" [20] є яскравим прикладом міського цифрового двійника, де детальні 3D моделі будівель (частково створені за допомогою аерофотозйомки та лазерного сканування) інтегровані в єдину ГІС-платформу для міського планування, аналізу та управління.

- Німеччина: Ініціатива "Industrie 4.0" стимулює впровадження ЦД. Багато компаній використовують сканування для створення ЦД промислових об'єктів та оптимізації виробничих і логістичних процесів.

- Після руйнівної пожежі в соборі Паризької Богоматері у 2019 році [26], лазерне сканування відіграло ключову роль у його відновленні. Завдяки детальним 3D-сканам, виконаним професором Ендрю Таллоном у 2010 році, реставратори отримали точні дані про архітектурні деталі собору. Ці скани стали основою для створення цифрового двійника Нотр-Даму, що дозволило відтворити його первісний вигляд з високою точністю.

- У США лазерне сканування широко застосовується в будівництві для створення "as-built" моделей. Ці моделі відображають фактичний стан збудованої будівлі та використовуються для контролю якості виконання робіт, управління експлуатацією та обслуговуванням, а також для вирішення спорів між підрядниками та замовниками.

Майбутні напрями досліджень та перспективи розвитку

Незважаючи на значний прогрес, потенціал цифрових двійників будівель, заснованих на геоінформаційних методах, ще далеко не вичерпаний. Ключові напрями подальших досліджень включають:

- **Автоматизація Scan-to-BIM:** Розробка надійних та ефективних алгоритмів (зокрема, на основі глибокого навчання) для автоматичного розпізнавання об'єктів у хмарах точок та їх перетворення на семантично насичені BIM-моделі з мінімальним ручним втручанням [23].
- **Семантична інтероперабельність:** Розробка та впровадження відкритих стандартів та онтологій для забезпечення безшовної інтеграції даних з різних джерел (BIM, GIS, IoT, бази даних експлуатації) та різних платформ [6, 16]. Розвиток Linked Data підходів.
- **Динамічне оновлення ЦД:** Створення методів для автоматичного або напівавтоматичного оновлення геометрії та семантики ЦД на основі даних регулярного моніторингу (повторне сканування, дані з дронів, мобільних пристроїв) та даних реального часу з IoT.
- **Масштабування до міських ЦД (Urban Digital Twins):** Розробка архітектур та технологій для створення та управління ЦД на рівні районів, міст та регіонів. Це вимагає ефективних рішень для обробки, зберігання та візуалізації величезних обсягів гетерогенних просторових даних [17, 20].
- **Інтелектуальний аналіз та симуляція:** Розвиток алгоритмів штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) для аналізу даних ЦД: предиктивне обслуговування, виявлення аномалій, оптимізація енергоспоживання, моделювання складних процесів (поширення забруднень, транспортні потоки, поведінка натовпу) [10, 24].
- **Покращена візуалізація та взаємодія:** Розробка інтуїтивних інтерфейсів на основі веб-технологій, віртуальної (VR) та доповненої (AR) реальності для ефективної взаємодії користувачів з комплексними даними ЦД [25].
- **Кібербезпека та етика:** Дослідження та розробка надійних механізмів захисту даних ЦД, забезпечення приватності та вирішення питань власності на дані, особливо при інтеграції великої кількості IoT пристроїв та зовнішніх сервісів.

Висновки

Цифрові двійники репрезентують парадигмальний зсув у підходах до проектування, будівництва та експлуатації будівель і споруд, пропонуючи інтегроване та динамічне уявлення про фізичний об'єкт протягом усього його життєвого циклу. Геоінформаційні методи та технології, зокрема лазерне сканування, фотограмметрія та ГІС, відіграють незамінну роль у цьому процесі, забезпечуючи точний збір просторових даних, створення детальних 3D моделей та їх інтеграцію з іншими джерелами інформації (BIM, IoT).

Аналіз сучасного стану показує значні переваги використання ЦД для підвищення ефективності, контролю якості, оптимізації експлуатаційних витрат,

покращення безпеки та підтримки прийняття обґрунтованих рішень. Міжнародний досвід підтверджує стратегічну важливість та практичну цінність цієї технології.

Водночас існують виклики, пов'язані з автоматизацією створення моделей, інтероперабельністю даних, обробкою великих даних, забезпеченням оновлення в реальному часі та кібербезпекою. Подолання цих викликів через подальші наукові дослідження та технологічні розробки в галузі геоінформатики, комп'ютерних наук та інженерії дозволить повністю реалізувати трансформаційний потенціал цифрових двійників для створення більш стійкого, ефективного та безпечного збудованого середовища. Геоінформаційні методи залишатимуться ключовим інструментом на цьому шляху.

Список літератури

1. McKinsey Global Institute. (2017). *Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity*.
2. Grieves, M. (2014). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*.
3. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*.
4. Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., ... & Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin-driven prognostics and health management for complex equipment, *67(1)*, 169-172.
5. Lu, Q., Parlikad, A. K., Woodall, P., Donus, F., & Schooling, J. M. (2020). Developing a Digital Twin at building and city levels: A case study of the West Cambridge campus. *173(1)*, 37-52.
6. Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, *114*, 103179.
7. Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access*, *5*, 20418-20427.
8. Opoku, D. G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., & Rashidi, M. (2021). Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, *40*, 102726.
9. Bosché, F., Ahmed, M., Guerriero, A., & Rezgui, Y. (2020). The value of integrating Scan-to-BIM and energy simulation: A case study. *Automation in Construction*, *113*, 103060.
10. Logothetis, S., Radwan, A., et al. (2021). A BIM-Based Digital Twin Framework for Advanced Monitoring and Predictive Maintenance of Buildings, *13(11)*, 6239.

11. Tang, S., Shelden, D. R., Eastman, C. M., Pishdad-Bozorgi, P., & Gao, X. (2019). A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends, 101, 127-139.
12. Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs, 38, 109-127.
13. Vosselman, G., & Maas, H. G. (Eds.). (2010). Airborne and terrestrial laser scanning.
14. Remondino, F., & Campana, S. (Eds.). (2014). *3D recording and modelling in archaeology and cultural heritage: Theory and best practices*.
15. Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6(1), 1-15.
16. Liu, X., Wang, X., Wright, G., Cheng, J. C., Li, X., & Liu, R. (2017). A state-of-the-art review of the integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(2), 53.
17. Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D city models: State of the art review. *ISPRS international journal of geo-information*, 4(4), 2842-2889.
18. Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952-108971.
19. Centre for Digital Built Britain (CDBB). URL: <https://www.cdbb.cam.ac.uk/>
20. National Research Foundation, Prime Minister's Office, Singapore. (n.d.). *Virtual Singapore*. URL: <https://www.nrf.gov.sg/programmes/virtual-singapore>
21. Bolton, A., et al. (2018). *The Gemini Principles: Guiding values for the national digital twin and information management framework*. CDBB.
22. ISO. (n.d.). *ISO 23247: Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing*. URL: <https://www.iso.org/standard/78376.html>
23. Ochmann, S., Vock, R., & Klein, R. (2019). Automatic reconstruction of parametric building models from indoor point clouds. *Computers & Graphics*, 82, 122-133.
24. Zhao, J., Zhen, Z., Liu, Y., & He, Y. (2021). A review of digital twin technology applications in building energy management. *Energy and Buildings*, 250, 111307.
25. Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons.
26. The Vital Role of Laser Scanning in Heritage Conservation, URL: <https://globalsurvey.co.nz/surveying-gis-news/the-vital-role-of-laser-scanning-in-heritage-conservati>
27. Richter, R & Knospe, F & Trapp, M & Döllner, J. (2023). Dynamic Digital Twins: Challenges, Perspectives and Practical Implementation from a City's Perspective.

28. Watson, C., et al. (2020). Digital twins for the built environment: learning from manufacturing. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Smart Infrastructure and Construction*, 173(2), 83-92.

Tomashevskiy Vladyslav,
Kyiv National University of Construction and Architecture

CREATION AND USE OF DIGITAL TWINS OF BUILDINGS AND STRUCTURES: CURRENT STATUS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

In the era of digital transformation, the construction industry is actively implementing innovative approaches to enhance the efficiency, sustainability, and safety of facilities throughout their lifecycle. The concept of digital twins (DTs) is one of the key drivers of this transformation, offering a dynamic virtual representation of a physical building or structure, integrated with real-time data. The article analyzes the fundamental role of geoinformation methods and systems (GIS) in the processes of creating, updating, and using digital twins of buildings. Modern methods of geospatial data collection are examined in detail, including terrestrial and mobile laser scanning (TLS, MLS), photogrammetry (including the use of UAVs), as the main sources for obtaining accurate 3D geometry of existing objects. The importance of integrating GIS and BIM for creating comprehensive digital twins that combine a detailed internal model of the object with its external spatial context is highlighted. The integration of data from IoT sensors for real-time monitoring of structural conditions and environmental parameters is considered. International experience in the implementation of DTs in construction (Great Britain, Singapore, Germany) is analyzed. The key advantages of using DTs at various stages of the lifecycle – from design to operation and demolition – are identified. The main challenges and promising areas for further research are outlined, including process automation, data interoperability, scaling to the level of urban DTs, the application of artificial intelligence, and ensuring cybersecurity. The article proves that geoinformation methods are an integral technological foundation for realizing the full potential of digital twins in the construction industry.

Keywords: digital twin; buildings and structures; geographic information systems (GIS); laser scanning; photogrammetry; BIM; lifecycle management; Internet of Things (IoT); Scan-to-BIM.

REFERENCES

1. McKinsey Global Institute. (2017). *Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity*. {in English}

2. Grieves, M. (2014). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. {in English}
3. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. {in English}
4. Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., ... & Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin-driven prognostics and health management for complex equipment, 67(1), 169-172. {in English}
5. Lu, Q., Parlikad, A. K., Woodall, P., Donus, F., & Schooling, J. M. (2020). Developing a Digital Twin at building and city levels: A case study of the West Cambridge campus. 173(1), 37-52. {in English}
6. Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179. {in English}
7. Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418-20427. {in English}
8. Opoku, D. G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., & Rashidi, M. (2021). Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 40, 102726. {in English}
9. Bosché, F., Ahmed, M., Guerriero, A., & Rezgui, Y. (2020). The value of integrating Scan-to-BIM and energy simulation: A case study. *Automation in Construction*, 113, 103060. {in English}
10. Logothetis, S., Radwan, A., et al. (2021). A BIM-Based Digital Twin Framework for Advanced Monitoring and Predictive Maintenance of Buildings, 13(11), 6239. {in English}
11. Tang, S., Shelden, D. R., Eastman, C. M., Pishdad-Bozorgi, P., & Gao, X. (2019). A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends, 101, 127-139. {in English}
12. Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs, 38, 109-127. {in English}
13. Vosselman, G., & Maas, H. G. (Eds.). (2010). Airborne and terrestrial laser scanning. {in English}
14. Remondino, F., & Campana, S. (Eds.). (2014). *3D recording and modelling in archaeology and cultural heritage: Theory and best practices*. {in English}
15. Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6(1), 1-15. {in English}

16. Liu, X., Wang, X., Wright, G., Cheng, J. C., Li, X., & Liu, R. (2017). A state-of-the-art review of the integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(2), 53. {in English}
17. Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D city models: State of the art review. *ISPRS international journal of geo-information*, 4(4), 2842-2889. {in English}
18. Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952-108971. {in English}
19. Centre for Digital Built Britain (CDBB). URL: <https://www.cdbb.cam.ac.uk/>. {in English}
20. National Research Foundation, Prime Minister's Office, Singapore. (n.d.). *Virtual Singapore*. URL: <https://www.nrf.gov.sg/programmes/virtual-singapore>. {in English}
21. Bolton, A., et al. (2018). *The Gemini Principles: Guiding values for the national digital twin and information management framework*. CDBB. {in English}
22. ISO. (n.d.). *ISO 23247: Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing*. URL: <https://www.iso.org/standard/78376.html>. {in English}
23. Ochmann, S., Vock, R., & Klein, R. (2019). Automatic reconstruction of parametric building models from indoor point clouds. *Computers & Graphics*, 82, 122-133. {in English}
24. Zhao, J., Zhen, Z., Liu, Y., & He, Y. (2021). A review of digital twin technology applications in building energy management. *Energy and Buildings*, 250, 111307. {in English}
25. Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons. {in English}
26. The Vital Role of Laser Scanning in Heritage Conservation, URL: <https://globalsurvey.co.nz/surveying-gis-news/the-vital-role-of-laser-scanning-in-heritage-conservati>. {in English}
27. Richter, R & Knospe, F & Trapp, M & Döllner, J. (2023). Dynamic Digital Twins: Challenges, Perspectives and Practical Implementation from a City's Perspective. {in English}
28. Watson, C., et al. (2020). Digital twins for the built environment: learning from manufacturing. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Smart Infrastructure and Construction*, 173(2), 83-92. {in English}