

Комплексна цифровізація процесу створення енергоефективних збірних будівель

Владіслав Бутенко, аспірант (ORCID: 0000-0001-7385-3029)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

АНОТАЦІЯ

Представлено аналітичний огляд та методологічне обґрунтування необхідності впровадження комплексної цифровізації у сфері енергоефективного збірного будівництва. Зважаючи на глобальні виклики — енергетичну кризу, вимоги сталого розвитку та необхідність швидкого, якісного відновлення інфраструктури — традиційні будівельні процеси визнаються неефективними. Дослідження зосереджується на доведенні того, що максимальна енергоефективність та стійкість збірних будівель досягаються лише через синергетичну інтеграцію трьох ключових цифрових технологій.

Ключові слова: збірне будівництво, енергоефективність, будівельне інформаційне моделювання, параметричне проектування, цифровізація, оптимізація, цифровий двійник

1. ВСТУП

В умовах безпрецедентних глобальних викликів, включаючи енергетичну кризу, необхідність швидкого післявоєнного відновлення та гостру потребу у зниженні викидів парникових газів, збірно-модульне будівництво (префабрикація) набуває стратегічного значення. Цей метод забезпечує підвищену якість, прискорення термінів реалізації проєктів та мінімізацію відходів на будівельному майданчику. Однак, для того, щоб збірні будівлі повною мірою відповідали вимогам сталого розвитку та досягали найвищого рівня енергоефективності протягом усього свого життєвого циклу, необхідна глибинна технологічна трансформація. Цей перехід полягає у впровадженні комплексної цифровізації, що формує безшовний цифровий потік інформації через інтеграцію трьох ключових технологічних стовпів: Будівельного Інформаційного Моделювання (BIM), Штучного Інтелекту (ШІ) та Цифрових Двійників (Digital Twins). Їхня синергія є критично важливою для оптимізації як капітальних, так і експлуатаційних витрат на енергію.

Мета дослідження полягає у всебічному аналізі та методологічному обґрунтуванні інтегрованого підходу до комплексної цифровізації процесу створення та експлуатації енергоефективних збірних будівель. Дослідження прагне продемонструвати, як гармонізація BIM-технологій, Штучного Інтелекту та Цифрових Двійників забезпечує інструментарій для сталого, керованого зниження енергоспоживання, мінімізації вуглецевого сліду та глибокої оптимізації ресурсів протягом усього життєвого циклу об'єкта.

Об'єкт дослідження - процес створення (проекування та виробництва) та експлуатації енергоефективних збірних будівель.

Предмет дослідження - методологічні, технологічні та організаційні аспекти взаємодії ключових цифрових інструментів – BIM-технологій, Штучного Інтелекту та Цифрових Двійників – для забезпечення точного контролю та управління енергетичною ефективністю збірних будівель та підвищення їхньої загальної стійкості.

2. BIM ЯК ІНТЕГРАЦІЙНА ПЛАТФОРМА ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ЕНЕРГООПТИМІЗАЦІЇ

Будівельне Інформаційне Моделювання (BIM) є незамінним наріжним каменем комплексної цифровізації, виступаючи не просто як інструмент 3D-моделювання, а як централізована база даних (CBD). Ця база інтегрує всю інформацію про геометричні, функціональні, теплофізичні та енергетичні характеристики збірних компонентів, дозволяючи перейти від двовимірного креслення до багатовимірного моделювання (3D, 4D, 5D, 6D — енергетика).

Глибока інтеграція BIM та BEM (Building Energy Modeling): Критичною перевагою BIM є можливість раннього впровадження Моделювання Енергоспоживання Будівлі (BEM), що принципово відрізняється від традиційного підходу, де енергоаудит проводиться на пізніх етапах. Інтеграція BIM з BEM визнана інноваційною можливістю для експлуатації повного потенціалу BIM з метою оптимізації енергоспоживання [2]. Ця інтеграція дозволяє проводити BIM-орієнтований параметричний енергетичний аналіз. Інженери мають змогу симулювати тисячі комбінацій різних збірних елементів – від товщини структурно-ізоляційних панелей до типу заповнення склопакетів та коефіцієнта теплопередачі (U-value) [3]. Це дозволяє точно визначити оптимальне співвідношення між інвестиційними витратами та майбутньою економією, мінімізуючи такі ключові показники як Енергетична Інтенсивність Використання (EUI) та Піковий Річний Попит (APD). Проведення такого аналізу на етапі проєкування є запорукою того, що висока енергоефективність буде не лише задекларована, а й фізично "закладена" у виробничі специфікації збірних конструкцій [3].

3. ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ: ГЕНЕРАТИВНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧОГО ЛАНЦЮГА

Штучний Інтелект (ШІ) є каталізатором, який перетворює статичну інформаційну модель BIM на динамічний інструмент прийняття рішень, автоматизуючи складні ітераційні процеси проєкування та підвищуючи ефективність виробництва.

Генеративне проектування та прогностика енергії: На основі вхідних даних (кліматичні умови, вимоги до EUI, бюджетні обмеження) алгоритми ШІ, зокрема моделі генеративного проектування, можуть генерувати тисячі унікальних, енергооптимізованих архітектурних рішень. Цей процес займає години, а не тижні, як у традиційному проектуванні. Більше того, ШІ використовується для прогнозування енергоспоживання та оцінки вуглецевого сліду будівлі [5]. Аналіз на основі параметрів BIM-моделі дозволяє ідентифікувати компоненти, які найбільше впливають на карбонові викиди, що є критичним для сертифікації зелених збірних будівель та забезпечення їхньої низьковуглецевої продуктивності [4, 5].

Оптимізація виробництва та логістики: Впровадження ШІ у виробничий ланцюг збірного будівництва є ключовим для подолання проблеми високої початкової вартості. Використовуючи BIM-модель, ШІ оптимізує розкрій матеріалів, мінімізуючи будівельні відходи, а також планує складні логістичні схеми. Це включає розрахунок послідовності виробництва, транспортування та збірки компонентів за принципом "точно в строк" (Just-in-Time) [5]. Забезпечення точного узгодження постачання з графіком монтажу знижує складські витрати, мінімізує простой на будівельному майданчику та значно зменшує загальну вартість збірних конструкцій, що підкреслює вирішальну роль BIM у цілому [4].

4. ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ: ДИНАМІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ

Цифрові Двійники (Digital Twins) є фінальним, найбільш прогресивним етапом цифровізації. Вони перетворюють проєктні характеристики у гарантовану експлуатаційну ефективність протягом усього терміну служби зірної будівлі.

Динамічний моніторинг та прогностичний контроль: Цифровий Двійник — це складна віртуальна копія фізичної будівлі, що створюється на основі фінальної BIM-моделі (as-built) і постійно живиться даними в реальному часі від розгалуженої мережі Інтернету Речей (IoT) [1]. Сенсори безперервно збирають інформацію про температуру, вологість, якість повітря, завантаженість приміщень та фактичне споживання енергії. На відміну від статичних розрахунків, які швидко втрачають актуальність, Двійник забезпечує динамічне управління енергетичними та інженерними системами. Це дозволяє здійснювати:

1. Прогнозне технічне обслуговування: Двійник прогнозує потенційні несправності обладнання (наприклад, системи HVAC) до їх виникнення, запобігаючи непередбаченим втратам енергії та дорогим ремонтам.
2. Адаптивне регулювання: На основі прогнозів погоди та фактичного використання будівлі, Двійник автоматично коригує роботу систем автоматизації, наприклад, зменшуючи або збільшуючи подачу тепла чи охолодження лише в тих зонах, де це необхідно [2].

Така технологічна інтеграція є найбільш ефективною для підвищення автономності та стійкості будівель, що є життєво необхідним для об'єктів у складних умовах та під час енергетичного дефіциту [1].

ВИСНОВКИ

Комплексна цифровізація, що ґрунтується на нерозривній синергії BIM, ШІ та Цифрових Двійників, є не

просто майбутнім, а стратегічною необхідністю для сучасного енергоефективного збірного будівництва. Результати проведеного аналізу демонструють, що ця інтеграція забезпечує багаторівневу та наскрізну оптимізацію:

1. На етапі проектування та виробництва: BIM слугує єдиним джерелом достовірної інформації, усуваючи конфлікти та помилки до початку фізичних робіт. Його інтеграція з ШІ дозволяє не лише досягти прецизійної енергооптимізації через параметричний аналіз [3], але й мінімізувати екологічний та економічний збиток шляхом прогнозування та зниження вуглецевого сліду та будівельних відходів [5, 4]. Це суттєво знижує початкові капітальні витрати та прискорює вихід на ринок.
2. На етапі експлуатації: Впровадження Цифрових Двійників спільно з IoT кардинально змінює підхід до управління будівлею. Вони забезпечують динамічну ефективність, перетворюючи статичні розрахунки на постійно оптимізований робочий процес. Це гарантує, що заявлена проєктна енергоефективність не буде втрачена з часом, що є ключовим для реалізації довгострокових цілей сталого розвитку. Крім того, ця технологія підвищує операційну стійкість та енергетичну автономність об'єктів, що має особливе значення в умовах підвищених ризиків та нестабільності енергопостачання [1].

Таким чином, комплексна цифрова стратегія є не лише проміжним технологічним кроком, а фундаментальною зміною парадигми, що забезпечує високу якість, швидкість та довгострокову екологічну відповідальність збірних будівель. Це є ключем до масового впровадження високоенергоефективного будівництва та ефективного використання національних ресурсів.

Список літератури

- [1] Піменов С. Енергоефективність та цифровізація: виклики та можливості для будівельної галузі України в умовах енергетичного дефіциту. (2024). *Theoretical and applied issues of economics* 2(49). с.150-166.
- [2] Mohammed Alhammad, Matt Eames and Raffaele Vinai. Enhancing Building Energy Efficiency through Building Information Modeling (BIM) and Building Energy Modeling (BEM) Integration: A Systematic Review. (2024). *Buildings*, 14(3), 581.
- [3] Mohammad Najjar, Laryssa Franco de Carvalho Willcox, Mohammad Khalas, Bruno Da Costa, Assed Naked Haddad, Dieter Boer. BIM and Experimental Design Analysis Toward Sustainable Energy Efficiency in Buildings: A Modular Construction Case Study. (2023). *Proceedings of CIRMARE 2023*.
- [4] Yuhong Wang, Xiaoqin Li. Energy optimization and low-carbon development of prefabricated buildings enabled by BIM technology. (2025). *Science and Technology for Energy Transition* 80, 37. pp. 1-12.
- [5] Habib Ullah, Hong Zhang, Baolin Huang, Yinan Gong. BIM-Based Digital Construction Strategies to Evaluate Carbon Emissions in Green Prefabricated Buildings. (2024). *Buildings* 2024, 14, 1689.