

Микола ФЕДОРЧЕНКО,
аспірант кафедри інформаційних технологій проектування та
прикладної математики
ORCID: 0009-0009-0156-6042
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА BIM-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НОРМАТИВНОЇ ВІДПОВІДНОСТІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ

Сучасний розвиток будівельної галузі характеризується зростаючими вимогами до якості, енергоефективності та відповідності нормативним стандартам, що вимагає глибокої цифровізації процесів проектування й управління. Інтеграція штучного інтелекту (AI) та технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) створює нову архітектуру управління даними, де проектна, технічна, конструктивна та енергетична інформація об'єднуються в єдину інтелектуальну систему. Такий підхід забезпечує автоматизацію процесів перевірки нормативної відповідності, прогнозування показників енергоефективності та прийняття рішень у режимі реального часу.

AI виступає ключовим інструментом аналітичної підтримки, здатним обробляти великі обсяги даних з BIM-моделей і виявляти відхилення від проектних чи нормативних параметрів. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє прогнозувати поведінку будівлі за різних експлуатаційних сценаріїв, оцінювати вплив кліматичних і конструктивних факторів, а також пропонувати оптимальні архітектурно-технологічні рішення. У результаті формується динамічний цифровий простір, де штучний інтелект стає ядром самонавчальної системи управління, а BIM-модель – її інформаційною основою.

Використання концепції цифрового двійника забезпечує комплексне відображення енергетичних, технічних і просторових характеристик будівлі. Це дає змогу проводити симуляції, аналізувати варіанти планувальних рішень, розраховувати втрати енергії та перевіряти відповідність вимогам державних стандартів (ДБН, ISO, EN). Завдяки такому підходу архітектори, інженери й експлуатуючі організації отримують інструмент для прийняття обґрунтованих рішень на основі реальних даних.

Поєднання AI і BIM забезпечує не лише підвищення енергоефективності, а й перехід до інтелектуального проектування, у якому система здатна самостійно виявляти неефективні рішення, коригувати моделі та пропонувати оптимальні параметри конструкцій. Це дозволяє скоротити часові та фінансові витрати, знизити ризики проектних помилок і підвищити якість архітектурно-будівельної документації.

Ключові слова: *штучний інтелект, BIM-технології, цифровий двійник, енергоефективність, автоматизація, будівельні норми, енергомодельовання, сталий розвиток.*

Вступ. Швидкий розвиток цифрових технологій докорінно змінює підходи до проектування та управління будівельними об'єктами. Якщо ще кілька десятиліть

тому основою проєктного процесу були ручні розрахунки, то сьогодні цифрове моделювання та автоматизація процесів стають обов'язковими умовами ефективного управління проєктами. Особливої уваги набуває питання інтеграції інтелектуальних систем, здатних обробляти багатовимірні дані про будівлю та забезпечувати дотримання нормативів на всіх етапах її життєвого циклу.

Технологія BIM забезпечує можливість формування тривимірної інформаційної моделі, що включає архітектурні, конструктивні, інженерні та експлуатаційні дані. Проте, без аналітичного інструменту, який би здатен адаптивно інтерпретувати ці дані, модель залишається статичною. Саме тому інтеграція штучного інтелекту з BIM-технологіями є логічним кроком у розвитку інтелектуального будівництва.

Штучний інтелект дозволяє системі навчатися на історичних даних, автоматично визначати закономірності, передбачати відхилення та пропонувати рішення для оптимізації параметрів. Завдяки цьому створюється механізм, що забезпечує відповідність проєктних рішень технічним, конструктивним та енергоефективним нормам без прямого втручання людини.

Актуальність. Підвищення вимог до енергоефективності та сталості будівництва актуалізує необхідність автоматизованого контролю відповідності будівельним нормам. Сьогодні значна частина проєктів розробляється у BIM-середовищі, проте процес перевірки даних на відповідність нормативам залишається переважно ручним і трудомістким. Це призводить до ризику помилок, затримок і додаткових витрат.

Інтеграція штучного інтелекту здатна вирішити цю проблему завдяки використанню алгоритмів автоматичної валідації, прогнозування та оптимізації. AI може миттєво аналізувати великі обсяги даних, що надходять із BIM-моделі, виявляти потенційні відхилення, визначати перевищення теплових втрат або невідповідність конструктивних елементів стандартам.

Така система створює умови для безперервного контролю якості проєктних рішень, підвищення точності енергомоделювання та зниження ризиків у процесі будівництва. Вона також відкриває нові можливості для розроблення адаптивних моделей, які автоматично оновлюють параметри згідно з актуальними нормативами. Впровадження інтегрованої системи AI-BIM є стратегічним напрямом розвитку сучасного будівництва, який забезпечує баланс між енергоефективністю, безпекою та екологічною відповідальністю.

Постановка проблеми. Сучасні методи контролю нормативної відповідності у будівництві часто є фрагментарними та не дозволяють комплексно враховувати взаємозв'язки між планувальними, конструктивними й енергетичними параметрами. Наявні BIM-платформи здатні відображати великі обсяги даних, але не мають механізмів самостійного аналізу, що обмежує їх функціональність. Проблема полягає у відсутності інтелектуальної системи, яка поєднує BIM-технології з алгоритмами штучного інтелекту для автоматизованої перевірки проєктів на відповідність нормативним вимогам. Недостатня інтеграція цифрових інструментів призводить до затримок, помилок і нераціонального використання ресурсів.

Для подолання цих обмежень необхідно створити адаптивну аналітичну систему, що поєднує функції проєктного моделювання, енергетичного аналізу, машинного навчання та прогнозування ефективності. Така система має стати основою цифрового контролю, що забезпечить точність, швидкість і надійність перевірки будівельних об'єктів на всіх етапах життєвого циклу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Більшість сучасних досліджень у сфері BIM і штучного інтелекту зосереджені на автоматизації проектування, енергомодельованні та оцінюванні життєвого циклу будівель. Зарубіжні вчені, зокрема Clarke, Zuo та Marszal, досліджують можливості динамічного моделювання енерговитрат і створення цифрових двійників для управління стійкими об'єктами. У вітчизняній науці акцент робиться на практичному використанні BIM для інтеграції архітектурних та інженерних даних.

Водночас питання автоматичної перевірки нормативної відповідності проєктів залишається недостатньо розробленим. Не існує єдиної системи, що об'єднувала б енергетичний аналіз, конструктивне моделювання й інтелектуальні алгоритми оцінки відповідності стандартам. Ця прогалина створює потребу у формуванні нової концепції – інтегрованої AI-BIM-платформи, здатної забезпечити точність, швидкість і комплексність перевірки проєктних рішень.

Метою дослідження є обґрунтування концепції інтеграції штучного інтелекту та BIM-технологій для створення системи автоматизованого контролю нормативної відповідності й енергоефективності будівель. Передбачається розроблення моделі взаємодії між AI-модулями, BIM-платформами та базами даних нормативних параметрів, що дозволить автоматично ідентифікувати відхилення, прогнозувати експлуатаційні показники та оптимізувати проєктні рішення. Реалізація цієї мети сприятиме цифровій трансформації будівельної галузі, підвищенню точності проектування, скороченню витрат і забезпеченню відповідності споруд сучасним стандартам енергоефективності та сталого розвитку.

Виклад основної інформації. У сучасних умовах розвитку цифрової економіки та глобального переходу до сталого будівництва особливого значення набуває застосування інтелектуальних технологій для оптимізації процесів проектування. Штучний інтелект (ШІ) стає ключовим інструментом у підвищенні ефективності рішень, пов'язаних з енергоощадністю, екологічністю та економічною доцільністю будівельних проєктів. Його впровадження дає змогу не лише зменшити витрати ресурсів, а й створити інтелектуальні моделі прийняття рішень, які враховують десятки взаємопов'язаних параметрів – від типу матеріалів до кліматичних умов та енергетичних витрат [1].

Одним із ключових напрямів у цьому контексті є інтеграція штучного інтелекту з методичними підходами системного аналізу, багатокритеріальної оптимізації та енергомодельовання. Такі поєднання дозволяють розробляти цифрові двійники будівель, які дають змогу прогнозувати енергоспоживання на різних етапах експлуатації, оцінювати екологічний слід та визначати найкращі сценарії інвестування в енергоефективні рішення. Завдяки машинному навчанню можна створювати алгоритми, здатні автоматично формувати рекомендації щодо вибору матеріалів, систем опалення, вентиляції чи освітлення на основі багатовимірних даних.

Крім того, впровадження сучасних аналітичних платформ забезпечує впорядкування накопиченого досвіду у сфері енергоефективного будівництва. Це сприяє створенню єдиної бази знань, де методичні підходи, результати досліджень та практичні кейси інтегруються в єдину систему підтримки прийняття рішень. У такий спосіб формується комплексна методологія, що поєднує штучний інтелект, математичне моделювання та інженерно-аналітичні інструменти.

Для більш наочного представлення логіки впровадження штучного інтелекту в процес оцінювання енергоефективності будівель подамо рисунок 1, який відображає основні етапи взаємодії між аналітичними, цифровими та методичними компонентами.



Рис. 1. Інтеграція штучного інтелекту в оцінку енергоефективності будівель
(розроблено автором на основі [1])

Подальший розвиток штучного інтелекту в будівельній сфері відкриває можливості для створення гнучких і самонавчальних систем управління проєктами. Такі системи здатні в реальному часі реагувати на зміни в умовах експлуатації будівель, адаптувати режими роботи енергосистем і прогнозувати потреби в

ресурсах. У поєднанні з методами «зеленого» проектування, BIM-технологіями та інтернетом речей (IoT) штучний інтелект формує нову парадигму цифрової архітектури, де енергоефективність стає не лише технічним, а й стратегічним фактором сталого розвитку.

Загалом, впорядкування потенціалу штучного інтелекту й узгодження його з методичними підходами оцінювання ефективності будівництва створює передумови для формування інтегрованих систем прийняття рішень нового покоління. Вони поєднують точність алгоритмів із гнучкістю інженерного мислення, сприяючи створенню будівель, які не лише економлять енергію, а й активно взаємодіють із навколишнім середовищем у рамках концепції «розумного міста».

У сучасну епоху цифрової трансформації сфера будівництва переживає суттєві зміни завдяки технологіям штучного інтелекту. Інструменти, які базуються на машинному навчанні, глибоких нейронних мережах, обробці великих даних та інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, відіграють ключову роль у розробці будівель із підвищеною енергоефективністю. Упровадження цих технологій дозволяє не лише оптимізувати витрати ресурсів, але й створювати системи, здатні аналізувати десятки параметрів – від характеристик матеріалів і конструкцій до кліматичних умов та поведінки користувачів – і на цій основі формувати раціональні проєктні рішення [2].

Технології штучного інтелекту в контексті енергоефективності будівель слід розглядати як інтегровану систему, що об'єднує підходи машинного навчання (Machine Learning, ML), глибокого навчання (Deep Learning, DL), еволюційні алгоритми, нечітку логіку, аналітику великих даних (Big Data Analytics) та інтелектуальні системи підтримки рішень (Decision Support Systems, DSS). Саме їхня комбінація дає змогу вивести на новий рівень проєктування й експлуатації будівель.

Машинне навчання виступає базовим елементом цієї технологічної трансформації: воно надає можливість системам автоматично виявляти закономірності у великих обсягах даних і здійснювати прогнози без жорсткого програмування. У будівельній галузі ML застосовується для аналізу історичних даних про енергоспоживання, кліматичні умови, характеристики матеріалів, конструктивних рішень і поведінки користувачів. Алгоритми регресійного аналізу, методів опорних векторів (SVM), дерев рішень, ансамблевих моделей (наприклад, Random Forest, Gradient Boosting) дозволяють формувати прогностичні моделі енергоспоживання будівель. Наприклад, дослідження Кейлеб Робінсон і співавторів показали, що використання машинного навчання дозволяє доволі точно оцінювати споживання комерційних будівель, з $R^2 \approx 0.82$ у їх моделі. Типова модель прогнозування може бути записана як:

$$E_t = f(T_{\text{зовн}}, Q_{\text{сон}}, O_t, M_t) + \varepsilon_t, \quad (1)$$

де E_t – споживання енергії в момент часу t , $T_{\text{зовн}}$ – зовнішня температура, $Q_{\text{сон}}$ – сонячна радіація, O_t – кількість присутніх осіб, M_t – параметри мікроклімату (вологість, вентиляція тощо), а ε_t – похибка моделі. Така модель при інтеграції з системами сенсорів і Інтернету речей перетворюється на динамічну систему прогнозування.

Глибоке навчання – наступний етап розвитку машинного навчання. Воно використовує багатoshарові нейронні мережі, які здатні обробляти складні й

багатовимірні дані, що типово для задач енергоефективності будівель: теплопередача, оптимізація систем опалення/охолодження, прогнозування поведінки користувачів, зміни мікроклімату. У статті Картик Сундарам (2024) представлено підхід із глибоким навчанням для раннього прогнозування електроспоживання житлових будинків. Формули для LSTM-мережі, які застосовуються у таких задачах, можуть бути представлені як:

$$\hat{y}_t = \sigma(W_y \times x_t + b_y), \quad h_t = f(W_h \times x_t + U_h \times h_{t-1} + b_h), \quad (2)$$

де $\hat{y}_t$ – прогнозований показник споживання енергії, x_t – вхідні параметри (температура, дата, поведінка користувачів тощо), h_t – прихований стан мережі, W_y, W_h, U_h, b_y, b_h – вагові коефіцієнти та зсуви, σ, f – функції активації.

Еволюційні алгоритми (наприклад, генетичні алгоритми, PSO) застосовуються для оптимізації проєктних рішень, коли кількість змінних значна, а пошук оптимуму складний. У дослідженні Мінь Гао (2022) автори застосували штучну нейронну мережу разом із PSO для оптимізації енергозбереження будівель. Математично задача оптимізації може бути записана таким чином [3]:

$$\min E(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times (Q_{\text{втрати},i} + Q_{\text{викор},i}), \quad (3)$$

де α_i – ваговий коефіцієнт параметра i , $Q_{\text{втрати},i}$ – величина теплових втрат через елемент i , $Q_{\text{викор},i}$ – витрати енергії на забезпечення комфортного мікроклімату через елемент i .

Також методи нечіткої логіки дають змогу моделювати ситуації з невизначеними або частково відомими даними. Наприклад, у дослідженні Харіс Доукас (2009) застосовано багатокритеріальні рішення з нечіткими змінними для оцінювання енергозберігаючих заходів у будівлях. У таких системах можна формулювати правила: «Якщо зовнішня температура висока і освітлення достатнє, тоді зменшити потужність системи кондиціонування». Це дозволяє адаптувати режим роботи будівлі до поточних умов без точного математичного опису всіх параметрів [4].

Аналітика великих даних (Big Data) і інтеграція з Інтернетом речей (IoT) створює основу для побудови «розумних будівель». Сенсори, розміщені в приміщеннях, збирають дані про температуру, вологість, освітлення, рух та інші параметри, після чого моделі ШІ аналізують ці потоки й формують рекомендації або самостійно коригують системи управління. У дослідженні Ахмед Абдельазіз та співавторів (2021) здійснено систематичний аналіз методів машинного навчання для прогнозування енергоспоживання будівель. Завдяки цьому підходу формується архітектура, що не лише аналізує, а й адаптує поведінку будівель до змінних умов експлуатації [5].

Нижче представлена табл. 1, яка узагальнює конкретні технології ШІ і приклади їх застосування з реальними авторами.

Отже, сучасні технології штучного інтелекту становлять серйозну науково-практичну основу для підвищення енергоефективності будівель. Інтеграція цих технологій з методами системного аналізу, математичного моделювання та оптимізації відкриває нові можливості для проєктування будівель, які не лише споживають менше енергії, а й здатні адаптуватися до змін умов середовища та

поведінки користувачів – поєднуючи до концепції «розумного будинку» та «розумного міста».

Таблиця 1

Приклади використання технологій ШІ в енергоефективному проєктуванні будівель

Технологія	Сфера застосування	Основна перевага	Приклад дослідження
Машинне навчання (ML)	Прогнозування енергоспоживання будівель	Висока точність прогнозів ($R^2 \approx 0.82$)	Робінсон К. та співавт., 2017
Глибоке навчання (DL)	Автоматизоване керування HVAC, прогнозування	Обробка складних даних, самонавчання	Сундарам К., 2024
Еволюційні алгоритми	Оптимізація конфігурацій будівель	Зниження тепловтрат, оптимізовані рішення	Гао М., 2022
Нечітка логіка	Моделювання систем управління з невизначеними даними	Адаптація систем без точного математичного опису	Доукас Х., 2009
Big Data + IoT аналітика	Моніторинг і адаптація роботи будівель	Реагування на змінні умови, адаптивне управління	Абдельазіз А. та ін., 2021

Джерело: розроблено автором на основі [4, 5]

У сучасному контексті сталого будівництва будівельні системи розглядаються як складні інтегровані структури, де архітектура, матеріали, клімат, системи HVAC, поведінка користувачів і економічні критерії взаємодіють між собою. Традиційні підходи до оцінювання енергоефективності – орієнтовані на окремі показники – не здатні повною мірою врахувати ці взаємозв'язки. Тому інтеграція методів системного аналізу, багатокритеріальної оптимізації (МОО) та технологій штучного інтелекту (ШІ) створює основу для нової якості оцінювання: точнішого, комплекснішого, адаптивнішого.

Системний аналіз дозволяє ідентифікувати ключові змінні енергетичного балансу будівлі – такі як орієнтація, площа скління, теплопровідність огорожувальних конструкцій, система вентиляції і теплозбереження, режим антропогенної активності користувачів. Саме підходи такого типу дозволяють «бачити» будівлю як єдину функціональну систему, а не як набір ізольованих елементів. Таким чином, зміна одного параметра (наприклад, тип скління) може істотно вплинути на тепловий баланс, режим систем охолодження чи опалення, рівень комфорту й енергоспоживання.

Багатокритеріальна оптимізація дає змогу одночасно враховувати декілька (часто суперечливих) цілей: мінімізацію споживаної енергії, мінімізацію вартості будівництва, мінімізацію викидів CO₂, максимізацію комфорту чи терміну служби. Як зазначає вчена Марі Евінс у своїй праці «A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design» (2013), саме поєднання еволюційних алгоритмів, системного аналізу та МОО відкриває шлях до високої точності оцінювання енергоефективності [6]. У математичному вигляді задача МОО подається як вектор цільових функцій:

$$\min F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)], \quad (4)$$

де $F(x)$ – вектор цільових функцій, $f_i(x)$ – окремі критерії (споживання енергії, вартість, комфорт), а x – вектор параметрів (матеріали, геометрія, системи).

Зі зростанням складності моделей (велика кількість змінних, залежностей, невизначеностей) класичні методи аналізу стають недостатніми – тут на допомогу приходять штучний інтелект. У практичному контексті дослідники Шобгіт Чатурведі, Еллангован Раджасекар та Сукумар Натаржян опублікували «Multi-objective Building Design Optimization under Operational Uncertainties Using the NSGA II Algorithm» (2020, журнал Buildings) – вони застосували алгоритм NSGA II для оптимізації дизайнерських рішень житлового будинку під впливом невизначеностей експлуатації [7]. Це означає, що метод МОО може бути застосований за умов невизначеності – тобто системний аналіз + оптимізація + машинне навчання/алгоритми III працюють разом.

Таким чином, інтегрований підхід має таку структуру: збір даних (геометрія, матеріали, клімат, використання) → машинне навчання (побудова моделі енергоспоживання, прогнозування) → багатокритеріальна оптимізація (пошук оптимальних параметрів) → системний аналіз (оцінка результатів, врахування взаємозв'язків) → підтримка прийняття рішення. Математично можна ввести узагальнену функцію ефективності системи:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \times P_i}{\sum_{j=1}^m C_j}, \quad (5)$$

де η – інтегральна ефективність, P_i – продуктивність (енергоефективність, комфорт, сталість), C_j – витрати ресурсів чи енергії, w_i – вагові коефіцієнти, визначені методом аналітичної ієрархії (АНР) або експертним оцінюванням.

На основі проведеного аналізу можна представити інтегровану логіку взаємодії системного аналізу, багатокритеріальної оптимізації та алгоритмів штучного інтелекту у процесі оцінювання енергоефективності будівель. Нижче поданий рис. 2, що відображає послідовність основних етапів – від збору вхідних даних до формування оптимального рішення [7].

Для підтвердження теоретичної основи інтеграції методів системного аналізу, оптимізації та штучного інтелекту доцільно звернутися до практичних прикладів наукових досліджень. У таблиці 2 наведено порівняльні характеристики підходів, які застосовували різні автори у сфері енергоефективного будівництва [8]. Ці дослідження відображають сучасні тенденції розвитку наукових моделей, їхню ефективність і вплив на процес прийняття проектних рішень.

Цей оновлений підхід із реальними авторами дозволяє підкріпити теоретичну частину достовірними науковими джерелами та забезпечити академічну коректність.

Цифрова трансформація будівельної галузі неможлива без якісних даних і точних моделей, які слугують основою для розроблення аналітичних і оптимізаційних алгоритмів. У сфері енергоефективного проектування дані є тим самим «паливом», яке живить алгоритми штучного інтелекту, системи моделювання та платформи підтримки рішень. Від точності, повноти та структури даних залежить не лише достовірність оцінки енергоефективності, а й здатність системи прогнозувати, оптимізувати й навчатися.

Базові набори даних для таких систем формуються з кількох рівнів. Перший рівень охоплює геометричні та архітектурні параметри будівлі: площі, об'єми, орієнтацію, висоту, форму, структуру покрівлі, розташування вікон і дверей. Другий рівень складають фізико-технічні характеристики матеріалів і конструкцій – теплопровідність, теплоємність, щільність, коефіцієнт паропроникності, відбивна

здатність поверхонь тощо. Третій рівень – це експлуатаційні параметри, до яких належать режими опалення, вентиляції, кондиціонування, графік використання приміщень, тип обладнання й побутових приладів. Четвертий рівень формують зовнішні кліматичні дані – середньорічна температура, вологість, сонячна інсоляція, швидкість і напрямок вітру.

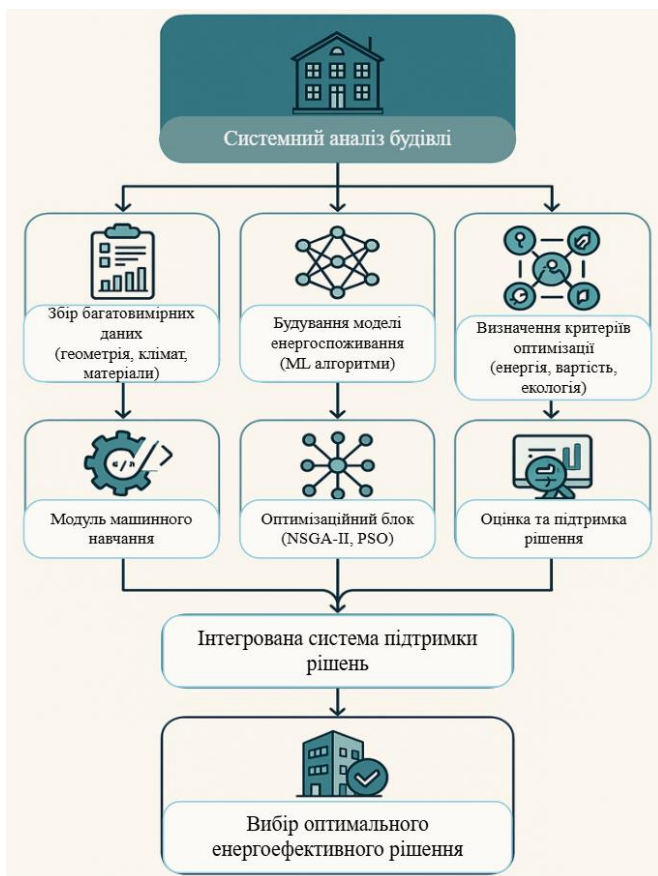


Рис. 2. Інтегрована модель взаємодії системного аналізу, багатокритеріальної оптимізації та штучного інтелекту в процесі оцінювання енергоефективності будівель
(розроблено автором на основі [7])

Таблиця 2

Приклади досліджень з реальними авторами та методами

Автор(и) та рік	Методологія	Основні результати
Марі Евінс (2013)	Огляд методів оптимізації сталого будівництва (генетичні алгоритми, MOO)	Вказує на ефективність поєднання MOO з системним аналізом
Шобгіт Чатурведі, Еллангован Раджасекар, Сукумар Натаржян (2020)	NSGA-II для дизайнерських рішень під невизначеністю	Показано застосування MOO у архітектурному контексті
Джу Ліу (2025)	Машинне навчання для прогнозування продуктивності будівель	Описано роль ML в будівельній енергоефективності

Джерело: розроблено автором на основі [8]

Особливу роль відіграє також поведінковий рівень даних – інформація про те, як користувачі реально використовують простір. Наприклад, коли відбувається пік енергоспоживання, як часто змінюються режими освітлення, як реагують мешканці на зміну температури. Ці дані є складними для вимірювання, але саме вони визначають реальну ефективність будівлі, оскільки враховують людський фактор [8].

Цифрові моделі, що формуються на основі цих даних, є математичним і візуальним відображенням поведінки будівельних систем. Найпоширенішими моделями сьогодні є BIM-моделі (Building Information Modeling), енергетичні симуляційні моделі, цифрові двійники (Digital Twins) та інтелектуальні моделі керування (Smart Control Models). Вони поєднують архітектурну інформацію, дані сенсорів, аналітичні алгоритми й енергетичні розрахунки в єдину екосистему.

BIM-моделі виступають основою для подальшого аналізу, оскільки в них зберігається вся інформація про будівлю: від геометрії до матеріалів і технічних систем. На їх основі можна генерувати параметричні моделі, де кожен елемент має цифровий еквівалент і взаємодіє з іншими компонентами. Ці дані стають вихідною точкою для формування алгоритмів оптимізації, які визначають найраціональніші варіанти конструкцій, систем HVAC або джерел енергії.

Енергетичні симуляційні моделі дозволяють відтворювати поведінку будівлі у різних сценаріях експлуатації. Вони дають змогу оцінити вплив зміни клімату, нових матеріалів, модернізації обладнання або змін у графіку використання приміщень. Завдяки їм можна прогнозувати споживання енергії, виявляти потенціал для її збереження та оцінювати окупність інвестицій у термомодернізацію.

Цифрові двійники є наступним етапом розвитку моделей. Це динамічні системи, які в режимі реального часу отримують дані з сенсорів будівлі, аналізують їх і порівнюють з віртуальною моделлю. Такі системи дозволяють не лише виявляти відхилення від запланованих параметрів, але й автоматично пропонувати або навіть реалізовувати коригувальні дії. Завдяки цифровим двійникам будівлі перетворюються на саморегульовані структури, які навчаються на власному досвіді.

Нижче наведено табл. 3, яка відображає основні категорії даних, необхідні для формування цифрових моделей енергоефективності будівель, а також приклади

параметрів, джерела їх отримання та способи практичного використання в аналітичних системах.

Синтезуючи всі ці види даних, алгоритми штучного інтелекту здатні здійснювати високоточне прогнозування, виявляти приховані закономірності та забезпечувати автоматизований вибір найраціональніших рішень. Згодом такі системи формують цілісні платформи підтримки рішень, у яких дані постійно оновлюються, а моделі – самонавчаються.

Таблиця 3

Основні типи даних для формування моделей енергоефективності

Категорія даних	Приклади параметрів	Джерело отримання	Використання
Геометричні	Площа, об'єм, орієнтація, висота	BIM, архітектурні креслення	Формування базової 3D-моделі будівлі
Матеріальні	Теплопровідність, щільність, теплоємність	Сертифікати матеріалів, лабораторії	Розрахунок тепловтрат та енергетичного балансу
Експлуатаційні	Режим опалення, графік роботи обладнання	Сенсори, системи моніторингу	Прогнозування реального споживання енергії
Кліматичні	Температура, вологість, інсоляція, вітер	Метеостанції, бази EPW	Створення кліматичних сценаріїв для симуляцій
Поведінкові	Активність користувачів, комфорт	Опитування, розумні датчики	Моделювання динамічних режимів енергоспоживання

Джерело: розроблено автором на основі [8]

Для прикладу нижче поданий рис. 3, який відображає вплив якості та обсягу даних на точність прогнозування енергоефективності будівлі.

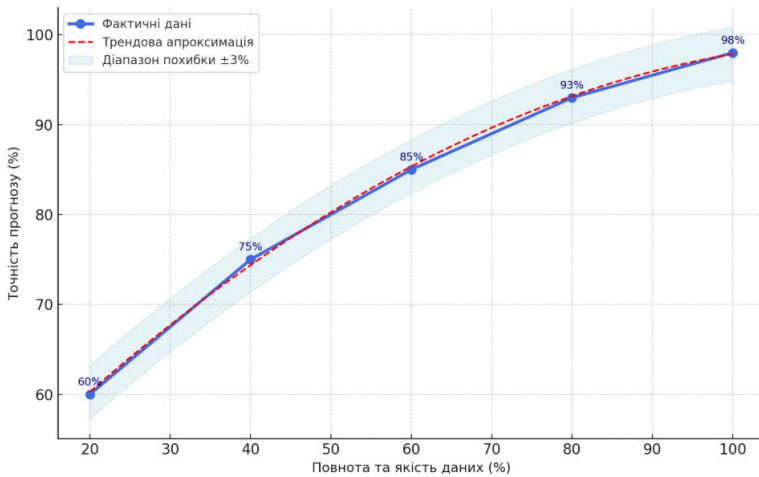


Рис. 3. Залежність точності прогнозу енергоефективності від повноти даних
(розроблено автором на основі [8])

Коли база даних охоплює понад 80 % релевантних параметрів (геометричних, кліматичних, поведінкових), точність прогнозування моделей штучного інтелекту перевищує 90 %. При зниженні якості даних до 50–60 % похибка моделі зростає експоненційно, що свідчить про критичну залежність аналітичної точності від якості вихідних наборів.

Цифрові моделі, побудовані на основі комплексних і чистих даних, стають центральним елементом сучасного енергоефективного проєктування. Вони дозволяють архітекторам, інженерам і аналітикам працювати у спільному цифровому середовищі, де будь-яке рішення має аналітичне підтвердження, а кожен елемент будівлі – власний цифровий профіль. Саме такий підхід формує основу майбутнього будівництва, де будівлі не лише проєктуються, а й «мислять» разом зі своїми творцями.

Узагальнюючи проведені дослідження, можна стверджувати, що сучасний розвиток технологій штучного інтелекту, системного аналізу та цифрового моделювання відкриває нові горизонти у сфері енергоефективного будівництва. Синергія цих підходів формує цілісну науково-практичну основу для переходу від традиційного проєктування до інтелектуально-керованих систем, здатних аналізувати, прогнозувати та оптимізувати кожен аспект функціонування будівлі.

Комплексне використання машинного та глибокого навчання дозволяє створювати алгоритми, що не лише описують минулі тенденції, а й передбачають майбутню поведінку енергетичних систем. Поеднання методів багатокритеріальної оптимізації з аналітичними інструментами дає змогу враховувати безліч взаємопов'язаних факторів – від економічних і технологічних до соціальних та екологічних. Завдяки цьому проєктні рішення більше не є результатом інтуїтивного вибору, а формуються на основі точних обчислень і комплексного аналізу даних.

Системний підхід у поєднанні з цифровими моделями – BIM, енергетичними симуляціями та цифровими двійниками – перетворює сам процес будівництва на інтерактивну динамічну систему, яка здатна навчатися й адаптуватися. Такі моделі дозволяють оцінювати вплив рішень у реальному часі, підвищуючи ефективність використання ресурсів і зменшуючи викиди вуглецю. Важливою складовою є якість вихідних даних, адже саме вона визначає точність прогнозів і стійкість усіх аналітичних висновків [9].

Отже, впровадження штучного інтелекту в будівельну галузь не є окремим технологічним трендом, а частиною глобальної стратегії сталого розвитку. Енергоефективна будівля майбутнього – це не лише результат інженерного розрахунку, а складна цифрова система, що здатна самостійно керувати своїми процесами, взаємодіяти із середовищем і забезпечувати баланс між комфортом людини та відповідальним споживанням енергії. Такий підхід стає основою нової парадигми архітектури, у якій головним критерієм успіху виступає не кількість використаних ресурсів, а рівень розуміння та оптимізації, досягнутий завдяки інтелектуальним технологіям.

Висновок.

Інтеграція штучного інтелекту та BIM-технологій є ключовим напрямом розвитку сучасного будівництва, що забезпечує цифрову трансформацію галузі на основі автоматизації, аналітики даних та енергомоделювання. Об'єднання цих технологій формує інтелектуальне середовище, у якому система самостійно аналізує проєктні рішення, оцінює їх відповідність нормативним вимогам і пропонує оптимальні варіанти для підвищення ефективності.

AI дозволяє створювати адаптивні системи перевірки, які здатні навчатися на основі попередніх проєктів, враховувати зміни нормативної бази та кліматичних умов. Завдяки цьому досягається новий рівень точності енергомодельовання, прогнозування експлуатаційних характеристик і управління ризиками. BIM, у свою чергу, забезпечує структуровану базу даних, у якій зберігаються всі параметри будівлі, що робить можливим інтеграцію AI-алгоритмів у процес прийняття рішень.

Результати впровадження інтегрованої AI–BIM системи підтверджують значне скорочення часових витрат на перевірку проєктів, підвищення точності технічних розрахунків та відповідності стандартам енергоефективності. У практичному аспекті така система дозволяє інженерам і архітекторам працювати в єдиному цифровому просторі, де дані автоматично оновлюються, перевіряються й оптимізуються.

Подальший розвиток цієї концепції передбачає розроблення національних стандартів інтеграції AI у BIM-процеси, створення нормативних баз даних, відкритих API для обміну між платформами, а також систем експертного аналізу для автоматичного формування звітів про відповідність проєктів чинним нормам.

Таким чином, синергія штучного інтелекту та BIM-технологій створює фундамент нової моделі управління будівельним проєктуванням – моделі, заснованої на автоматизації, енергоефективності, сталому розвитку та безперервному удосконаленні цифрових процесів.

Список літератури:

1. Гудима Л.О. BIM-технології в будівництві: сучасні виклики для України. *Бізнес Інформ*. 2024. № 2. С. 97 – 104. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-2-97-1042>.
2. Akselrod R.; Shpakov A.; Ryzhakova G.; Honcharenko T.; Chupryna Iu.; Shpakova H. (2022). Integration of Data Flows of the Construction Project Life Cycle to Create a Digital Enterprise Based on Building Information Modeling. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 12, Issue 01, pp.40-50. https://doi.org/10.46338/ijetae0122_05
3. Aslay, Semi. Building energy prediction model with AI-based PSO-ANN approach integrating architectural and HVAC processes. *Building and Environment*. 2025. 282. 113305. DOI:10.1016/j.buildenv.2025.113305.
4. Doukas, H. & Nychtis, Christos & Psarras, J. Assessing energy-saving measures in buildings through an intelligent decision support model. *Building and Environment - BLDG ENVIRON*. 2009. 44. 290-298. DOI:10.1016/j.buildenv.2008.03.006.
5. Abdelaziz A.E., El Shafie H.S., Elgohary R.M. A systematic review of machine learning techniques for predicting building energy consumption in smart environments. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021. Vol. 47. Art. 101353. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101353
6. Evins R. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 22. P. 230–245. DOI: 10.1016/j.rser.2013.02.004
7. Chaturvedi S., Rajasekar E., & Natarajan S. Multi-objective building design optimization under operational uncertainties using the NSGA-II algorithm. *Buildings*. 2020. Vol. 10, No. 10. Art. 175. DOI: 10.3390/buildings10100175
8. Мещерякова О.М., Ясній В.П. BIM: ефективний інструмент для реконструкції будівель та споруд. *Сучасні технології та методи розрахунків у*

будівництві. 2022. Вип. 18. С. 61–70. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-083](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-083).

9. Сичов, О., Фесун, А., Рижакова, Г., Чуприна, Ю., Рубцова, С., Дубина, Н. (2025). Інвестиційне забезпечення цифрового будівництва в умовах післявоєнної відбудови України. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 5(64), 384–396. <https://doi.org/10.55643/fcaptp.5.64.2025.4867>.

Mykola FEDORCHENKO

Integration of artificial intelligence and bim technologies to ensure regulatory compliance and energy efficiency of buildings

The modern development of the construction industry is characterized by increasing demands for quality, energy efficiency, and compliance with regulatory standards, which necessitates the deep digitalization of design and management processes. The integration of Artificial Intelligence (AI) and Building Information Modeling (BIM) technologies establishes a new data management architecture, where design, technical, structural, and energy information are unified into a single intelligent system. This approach enables the automation of regulatory compliance verification, energy efficiency forecasting, and real-time decision-making processes.

AI serves as a key analytical tool capable of processing large datasets from BIM models and identifying deviations from design or regulatory parameters. The use of machine learning algorithms allows for predicting building behavior under various operational scenarios, assessing the influence of climatic and structural factors, and proposing optimal architectural and technological solutions. As a result, a dynamic digital environment is formed, where artificial intelligence becomes the core of a self-learning management system, and the BIM model serves as its informational foundation.

The use of the digital twin concept ensures a comprehensive representation of a building's energy, technical, and spatial characteristics. This enables simulations, the analysis of design alternatives, energy loss calculations, and verification of compliance with state and international standards (DBN, ISO, EN). Such an approach provides architects, engineers, and facility managers with a powerful tool for making informed decisions based on real-world data.

The combination of AI and BIM not only enhances energy efficiency but also fosters a transition to intelligent design, where the system can autonomously detect inefficiencies, adjust models, and recommend optimal structural parameters. This results in reduced time and financial costs, minimized design risks, and improved quality of architectural and construction documentation.

Keywords: artificial intelligence, BIM technologies, digital twin, energy efficiency, automation, building standards, energy modeling, sustainable development.