

Соболь Денис Валерійович

Аспірант кафедри менеджменту в будівництві,

<https://orcid.org/0000-0001-9986-9520>

Київський національний університет будівництва і архітектури

**АРХІТЕКТУРА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПРОЄКТІВ
ІЗ ПІДВИЩЕНИМИ ВИМОГАМИ ДО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ**

Анотація. Сучасні тенденції розвитку архітектури та будівництва дедалі більше зосереджуються на підвищенні енергоефективності, екологічній збалансованості та цифровій трансформації проєктних процесів. Зростання енергоспоживання в урбанізованих середовищах, підвищення стандартів комфорту та необхідність зменшення вуглецевого сліду стимулюють пошук нових підходів до формування архітектурно-технічних рішень. У роботі розглядаються принципи створення енергоефективних будівель, де архітектурна форма, конструктивна система та цифрові технології виступають єдиною інтегрованою платформою управління енергетичними потоками. Основна увага приділена поєднанню пасивних і активних стратегій енергозбереження: від орієнтації будівлі за інсоляцією, природної вентиляції та термічної інерції матеріалів до використання інтелектуальних систем контролю, таких як BMS, IoT, daylight harvesting та predictive maintenance. Окремо аналізується роль цифрових двійників і BIM-моделей у створенні адаптивної архітектури, здатної реагувати на зміни кліматичних умов і експлуатаційних параметрів у реальному часі. Розглядаються також сучасні інженерні рішення, що інтегрують відновлювані джерела енергії – BIPV, геотермальні системи, рекупераційні контури – у конструктивну оболонку будівлі. Такий підхід формує нову архітектурну парадигму, у якій технічні рішення стають не лише засобом енергозбереження, а й важливим елементом естетики, сталого розвитку та цифрової взаємодії систем. Ключовим аспектом стає інтеграція Smart Building-підходів, які поєднують датчики, аналітику й адаптивне управління мікрокліматом у єдину інформаційну систему. Це створює передумови для формування нових стандартів архітектурного проєктування, у яких будівля розглядається як «живий організм», що взаємодіє із середовищем, користувачем і міською інфраструктурою.

Ключові слова: енергоефективність; архітектурно-технічна модель; Smart Building; BMS; BIM; цифровий двійник; BIPV; вентиляція; сталий розвиток

Постановка проблеми

Одним із ключових викликів сучасної архітектури є забезпечення високої енергоефективності будівель у контексті урбанізації, зростання енергоспоживання та екологічних обмежень. Будівельна галузь залишається одним із найбільших споживачів енергії, що потребує переосмислення традиційних проєктних і технічних підходів. Проблема полягає не лише у зменшенні витрат енергоресурсів, а й у створенні динамічної архітектурної системи, здатної адаптуватися до змін зовнішнього середовища та поведінки користувачів. Більшість існуючих методів проєктування зосереджені на окремих аспектах енергозбереження, але не формують цілісну інтегровану модель взаємодії між архітектурними, інженерними та цифровими компонентами. Це зумовлює необхідність розроблення системного підходу до архітектурно-технічного моделювання, де

ключовими стають взаємодія енергетичної оболонки, автоматизованих систем управління та цифрових інструментів аналізу даних. У контексті глобальної трансформації до вуглецево-нейтральної економіки така інтеграція дозволяє формувати новий тип проєктного мислення, орієнтований на сталий розвиток, ефективність і комфорт.

Мета статті

Мета статті полягає у дослідженні принципів побудови архітектури технічних рішень для енергоефективних будівель і визначенні факторів, які забезпечують оптимальне поєднання функціональності, естетики та енергозбереження. Завданнями дослідження є аналіз впливу архітектурної форми, матеріалів, технологій і цифрових систем управління на енергетичну ефективність об'єкта; розроблення системної структури взаємодії пасивних і активних елементів будівлі; оцінка ролі BIM, BMS та Smart Building

технологій у підвищенні адаптивності архітектурно-технічних систем. Практичний аспект полягає у формуванні підходу до проектування інтегрованих енергоефективних рішень, які здатні забезпечити зниження енергоспоживання, покращення мікроклімату та стабільну експлуатацію будівель в умовах змінних кліматичних параметрів.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Сучасна наукова школа енергоефективного проектування активно розвивається у напрямку поєднання архітектурної інженерії та цифрових технологій. У працях Gu (2007) та Schmidt & Åhlund (2018) визначено, що ефективність енергетичних систем безпосередньо залежить від архітектурної інтеграції та алгоритмізації управління. Kolokotsa і Yalcintas доводять важливість контекстно-орієнтованих Smart Building рішень, які реагують на поведінку користувачів і зовнішні умови. В українських дослідженнях (Бахтін, 2023; Бурлак, 2023; Кузнєцова, 2020) акцент робиться на формуванні енергоефективних об'ємно-просторових структур і використанні природоінтегрованих підходів.

Інтеграція цифрових систем, таких як BIM і BMS, розглядається як ключовий фактор у підвищенні гнучкості архітектурних рішень. Праці Simonov (2021) і Бурмака (2021) показують, що оптимізація теплоізоляції та світлових характеристик оболонки будівлі може зменшити споживання енергії на 20–30%. Дослідження Åhlund (2022) і Energy Efficiency in Commercial Buildings (ESRU) демонструють, що перехід до предиктивних систем управління та енергоактивних фасадів забезпечує найвищий рівень стабільності енергетичних процесів.

У міжнародному контексті (Monash University, 2022; Huld, 2021) активно досліджується концепція BIPV – інтеграції фотоелементів у фасади, що поєднує архітектурну функцію із виробництвом енергії. Таким чином, сучасні дослідження показують: архітектура енергоефективних рішень переходить від концепції пасивного збереження енергії до динамічного управління енергетичними потоками, де будівля стає активним елементом енергосистеми.

Виклад основного матеріалу

У контексті сучасного будівельного проектування формування архітектурно-технічної моделі будівлі із підвищеним рівнем енергоефективності є ключовим завданням не лише з точки зору регуляторних норм, а й у ширшому стратегічному сенсі сталого розвитку. Відповідно до актуальних національних і міжнародних стандартів,

проектна документація, архітектурне планування та технічне оснащення мають бути орієнтовані на мінімізацію енергоспоживання при збереженні або підвищенні комфортності середовища. Принципова складність полягає в необхідності створення єдиної інтегрованої системи, в якій архітектурна форма, матеріали, технології та інженерні рішення функціонують як єдиний когерентний механізм.

Одним з основних теоретичних підходів до цього завдання є інтеграція пасивних і активних стратегій проектування. Пасивні стратегії включають орієнтацію будівлі, максимізацію природного освітлення, вентиляційні сценарії, теплоаккумуляцію огорожувальних конструкцій та зменшення теплових втрат через оболонку.

Активні стратегії передбачають використання високоефективних інженерних систем, які керуються інтелектуальними алгоритмами.

Розгляд цих двох шарів у системному взаємозв'язку дозволяє сформулювати ефективну архітектурно-технічну модель, яка забезпечує адаптивність до змін кліматичних умов, рівня заселеності, режиму використання приміщень [1].

У сучасній проектній практиці дедалі ширше застосовується ідеологія так званої енергетичної оболонки будівлі (building envelope). Цей підхід пропонує розглядати зовнішню архітектурну структуру не як нейтральний бар'єр, а як активний елемент теплового контролю. Прикладом може бути використання динамічних фасадів, склопакетів з низьким коефіцієнтом теплопередачі, а також фасадних систем із подвійним склінням, де проміжок між шарами слугує буфером для терморегуляції. Інтеграція таких елементів дає змогу значно скоротити енергоспоживання на опалення та охолодження.

Однією з найбільших дилем у процесі створення архітектурно-технічної моделі є знаходження оптимального співвідношення між коефіцієнтом остеклення фасадів (window-to-wall ratio – WWR) та характеристиками матеріалів. З одного боку, збільшення площі застеклення дозволяє підвищити рівень природного освітлення і зменшити витрати на штучне освітлення. З іншого – надмірне застеклення спричиняє перегрів улітку та значні втрати тепла взимку. Дослідження, проведені А. Wasilowski та С. Bichard (2020), демонструють, що оптимальне значення WWR становить 25–35% у помірному кліматі, за умови застосування потрібного скління з низькоемісійними шарами.

Додатковою особливістю архітектурно-технічного проектування є необхідність використання так званих гібридних структурних рішень, які поєднують традиційні будівельні матеріали (цегла, бетон, сталь) із сучасними енергозберігаючими компонентами – сендвіч-

панелями, композитними термоактивними блоками, біофасадними модулями. Такі рішення не лише зменшують енергоспоживання, але й відкривають можливості для сталого циклу експлуатації: скорочення будівельного сміття, переробка елементів оболонки, зниження вуглецевого сліду [2].

Значна частина досліджень у сфері енергоефективності будівництва акцентує увагу на зонуванні будівельного об'єкта відповідно до термічної інерції, функціонального навантаження та інсоляційного режиму. Архітектор М. Дітріх у своєму аналізі 2022 року доводить, що багатофункціональні об'єкти, спроектовані за принципом зонального теплового впливу (теплі зони – в центрі, буферні – по периферії), демонструють до 27% економії енергоресурсів порівняно зі стандартним модульним підходом.

Особливої уваги заслуговує формування сценаріїв адаптації архітектурних рішень до зовнішніх коливань, зокрема добових і сезонних змін температури. У межах цього дослідження застосовано формалізовану модель реакції архітектурно-технічного блоку на зовнішній температурний градієнт, що описується залежністю:

$$H_{\text{вн}}(t) = \frac{1}{K_{\text{заг}}G} \int_0^t [H_{\text{зов}}(\gamma) - H_{\text{вн}}(\gamma)] d\gamma + H_0, \quad (1)$$

де $H_{\text{вн}}(t)$ – внутрішня температура в момент часу t ; $H_{\text{зов}}(\gamma)$ – зовнішня температура в момент часу γ ; $K_{\text{заг}}$ – еквівалентний термічний опір будівлі; G – теплоємність внутрішнього середовища; H_0 – початкова температура.

Ця модель дозволяє прогнозувати ефективність огорожувальних конструкцій залежно від масивності будівлі, матеріалів і структури термічного захисту. Особливо ефективно модель застосовується при цифровому моделюванні сценаріїв опалення та охолодження.

Невід'ємною складовою ефективною архітектурно-технічної моделі є використання природної вентиляції як основного засобу зниження енерговитрат у перехідні сезони. Так звані рішення з «архітектурною вентиляційною логікою» (Architectural Ventilation Logic, AVL) передбачають орієнтацію і проектування віконних прорізів, дефлекторів і вентиляційних каналів так, щоб забезпечити природний рух повітря завдяки різниці температур і тиску. Наприклад, стратегія «вентиляційної башти» або «теплової труби» (Solar Chimney) довела свою ефективність у кліматах із великими добовими амплітудами температур. У результаті застосування AVL-рішень в будівлях університету Ноттінгема (UK) вдалося скоротити до 35% споживання електроенергії на вентиляцію без жодних активних систем [3].

Особливої уваги заслуговує поєднання пасивного опалення та охолодження через термічну інерцію матеріалів і фазових переходів. Наприклад, застосування у конструкціях стін або перекриттів фазозмінних матеріалів (Phase-Change Materials, PCM) дозволяє акумулювати тепло протягом дня та повільно віддавати його вночі, стабілізуючи внутрішній мікроклімат. Дослідження R. Baetens і F. Jelle (2021) демонструють, що включення PCM у штукатурку дає змогу знизити температурні коливання всередині приміщень до 4–5°C без використання кондиціонування. Це підтверджує ефективність концепції енергетичного згладжування, яка є ключовою для високої термічної стабільності без надлишкової активної енергетики.

Не менш важливою є роль архітектурних елементів для сонцезахисту, які мають сезонну варіативність. Використання навісів, козирків, динамічних жалюзі, зовнішніх штор і алюмінієвих лопатевих систем забезпечує зниження перегріву влітку та відкриття доступу до сонячної радіації взимку. Відомий приклад – будівля «Al Bahr Towers» в Абу-Дабі, де фасад складається з адаптивної геометрії, що відкривається і закривається залежно від положення сонця. Це не лише знижує енергоспоживання на кондиціонування, а й створює нову естетику енергетично обґрунтованої архітектури.

Архітектурна модель повинна адаптуватися не лише до кліматичних, а й до соціально-функціональних параметрів. Будівля школи, лікарні, офісу чи торгового центру має свої специфічні профілі навантаження, що змінюються у часі. Розробка динамічних сценаріїв експлуатації дає змогу адаптувати архітектурні рішення до реальних режимів використання приміщень. Наприклад, у проєкті Центру енергоефективності в Гельсінкі (2022) було застосовано систему внутрішніх перегородок з розумним управлінням, що змінюють прозорість і теплоізоляційні характеристики залежно від присутності людей та часу доби [4].

На нижченаведеному рис. 1 відображено логіку формування архітектурно-технічної моделі будівлі, орієнтованої на підвищену енергоефективність. Вона ілюструє послідовне об'єднання стратегічних, нормативних, архітектурних і інженерних елементів у цілісну систему, що базується на інтеграції пасивних і активних підходів. Особливу увагу приділено енергетичній оболонці, термічному зонуванню, вентиляційним сценаріям і сценаріям адаптації до кліматичних змін. Така структуризація дозволяє моделювати вискоелефективні будівлі, здатні реагувати на зовнішні й внутрішні змінні умови в реальному часі.

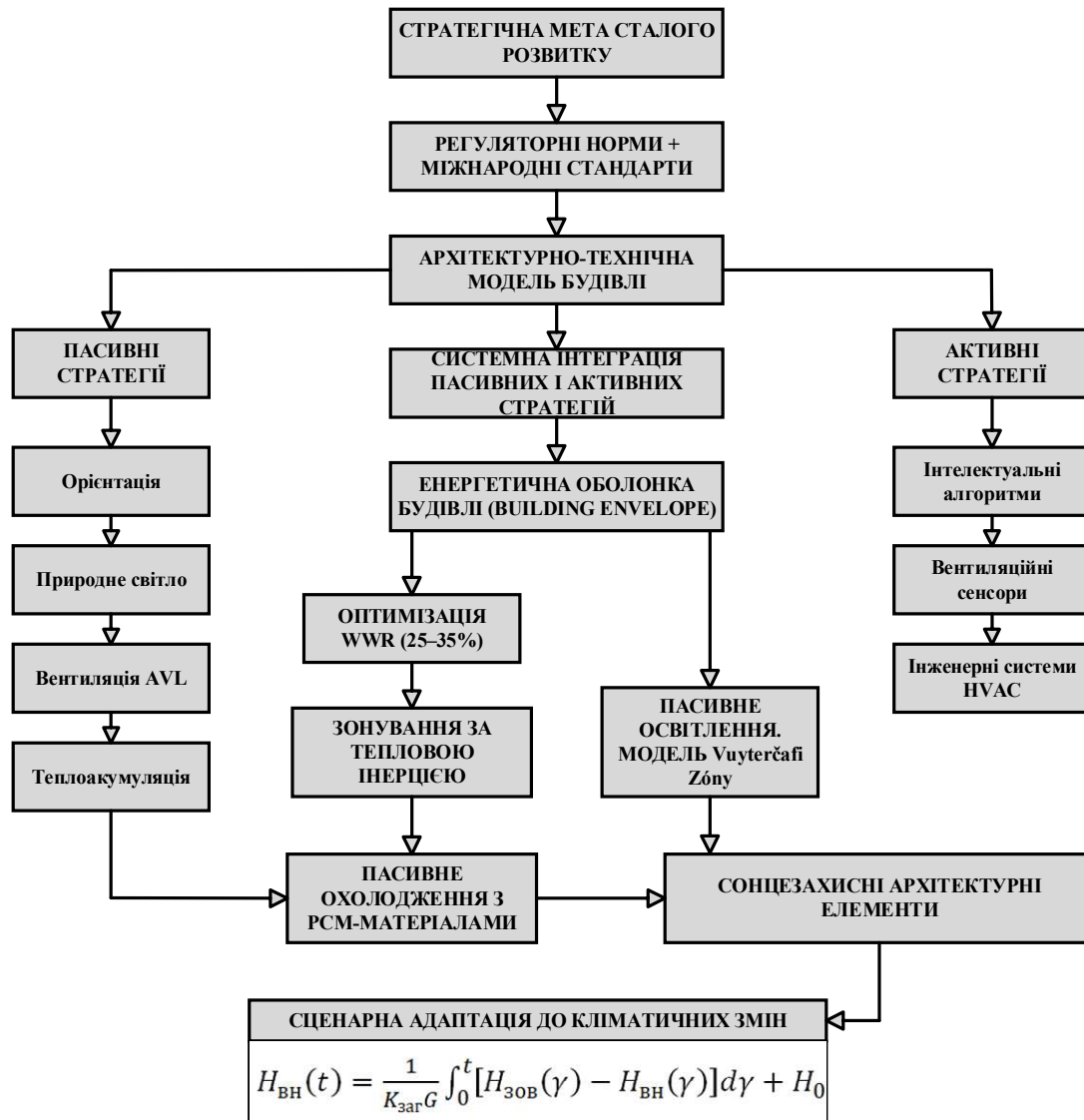


Рисунок 1 – Структура архітектурно-технічної моделі будівлі з підвищеною енергоефективністю
Розроблено автором на основі [4].

Додатковим шаром у формуванні технічної архітектури є комплексна симуляція сценаріїв освітлення та інсоляції. Застосування програм на зразок Radiance, Velux Daylight Visualizer або Grasshopper дозволяє не лише створити тривимірну модель освітленості, а й інтегрувати її з теплофізичними характеристиками будівлі. Це стає основою для енергетичного зонування – поділу приміщень за потребами в природному світлі та тепловому захисті, що істотно зменшує експлуатаційні витрати на HVAC-системи.

Таким чином, комплексна архітектурно-технічна модель енергоефективної будівлі формується не лише через конструктивні рішення й матеріали, а й через здатність адаптуватися до мінливих умов. Наступним важливим кроком у цьому напрямку стає впровадження інтелектуальних систем, що дозволяють перевести енергетичну

ефективність на рівень динамічного управління в режимі реального часу.

Ідея інтелектуалізації енергоефективного об'єкта передбачає не просто встановлення енергозберігаючого обладнання, а створення комплексного адаптивного середовища, здатного у реальному часі реагувати на зміни зовнішніх умов, потреб користувачів і внутрішні відхилення в експлуатаційних режимах. Інтелектуальні системи управління (ISU) формують новий тип архітектурного мислення, у якому проектування простору й енергетичних мереж розглядається не як статика, а як інформаційно-енергетичний потік. Це мислення реалізується через багаторівневу цифрову архітектуру – від сенсорної бази до алгоритмів прийняття рішень і самонавчання [5].

Наукова література останніх років висвітлює значну кількість досліджень щодо ефективності Smart

Building Technologies. Зокрема, праці М. Kolokotsa, Т. Yalcintas та Y. Goyal розкривають концепцію інтелектуального управління енергоспоживанням на основі контекстної адаптації. Архітектура таких систем, зазвичай, включає датчики середовища (температури, вологості, CO₂), виконавчі пристрої (регулятори заслінок, термостати, реле освітлення) та цифрову платформу, що реалізує логіку управління. Центральним елементом є алгоритмічна оболонка, яка визначає траєкторії дій за поточних параметрів.

Найбільш розповсюдженою формою є Building Management System (BMS), яка інтегрує контроль за вентиляцією, опаленням, освітленням, безпекою та доступом. Сучасні BMS працюють не просто за сценаріями, а на основі предиктивної аналітики. Наприклад, замість того, щоб вимикати кондиціонер о 20:00, система аналізує історичні дані, погодні умови, присутність людей і моделює, коли ефективніше знизити потужність.

Математичне забезпечення предиктивного управління базується на моделі стану системи, що представлена системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Gx(t) + Np(t) + S\sigma(t), \quad (2)$$

де $x(t)$ – вектор станів системи (температура, вологість, CO₂); $p(t)$ – вектор управляючих дій (потужність HVAC, освітлення, вентиляція); G, N, S – матриці параметрів системи; $\sigma(t)$ – стохастичні збурення, що відображають змінність зовнішніх умов.

Розробка такої моделі дає змогу реалізувати стратегію оптимізаційного управління на основі визначених цільових функцій. Зокрема, задача мінімізації сумарного енергоспоживання за умови підтримання температури в діапазоні 20–24°C формалізується як пошук мінімуму функціонала:

$$R = \int_0^H [\beta_1 (H_{\text{зад}} - H_{\text{факт}})^2 + \beta_2 y(t)^2] dt, \quad (3)$$

де $H_{\text{зад}}$ – задана температура; $H_{\text{факт}}$ – фактична; $y(t)$ – інтенсивність енергоспоживання; β_1, β_2 – вагові коефіцієнти.

Суттєвим кроком уперед у сучасній архітектурі стало використання систем машинного навчання для самоналаштування BMS, коли алгоритми, на основі багаторічних даних, формують прогнози ефективності тих чи інших рішень. Це означає, що система може виявити, що при певній швидкості вітру та напрямку сонця краще змінити кут нахилу жалюзі або включити часткове затінення. Такі приклади були реалізовані в офісних центрах компаній Siemens та Skanska, де використання нейронних мереж для керування кліматом зменшило витрати на енергію на 27% у середньому [6].

Не менш важливим є інтеграція ISU у фізичну архітектуру: усі розрахунки, симуляції та оптимізаційні алгоритми мають впливати на реальне

планування технічних зон, прокладку кабельних трас, розміщення серверних, маршрутизацію мереж. Це означає, що архітектурне рішення не може бути завершеним без узгодження з ІТ-платформою. Наприклад, BIM-моделі вже містять не лише геометрію, а й параметри автоматизації, і це дає змогу здійснювати цифровий двійник будівлі – віртуальну модель, яка живе у реальному часі, віддзеркалюючи та аналізуючи енергетичну поведінку будівлі.

Такі цифрові двійники використовують дані від сенсорів у режимі реального часу, які передаються через MQTT-протоколи, аналізуються на edge-пристроях і надсилаються в центральне середовище управління, де застосовуються аналітичні панелі типу PowerBI, Grafana або SCADA. Архітектор у цьому контексті працює не лише з матеріалами, а з потоками інформації, які моделюють поведінку об'єкта в енергетичному, тепловому та світловому аспектах [7].

Для забезпечення ефективного функціонування інтелектуалізованої енергоефективної архітектури необхідною умовою є чітка взаємодія між апаратними та програмними компонентами системи.

У табл. 1 подано ключові елементи таких систем, їх функціональне призначення та очікувані ефекти впровадження в контексті Smart Building-проектування.

Однією з ключових складових інтелектуальних систем управління в енергоефективних об'єктах є адаптивне керування освітленням, яке забезпечує баланс між комфортом користувача та мінімізацією споживаної електроенергії. У класичній архітектурі освітлення проектується згідно з нормативними рівнями люксів залежно від призначення приміщення. Проте в умовах Smart Building архітектура освітлення стає динамічною конструкцією, що реагує на денне світло, присутність людей, активність у приміщенні та навіть індивідуальні переваги.

Системи daylight harvesting (збір денного світла) використовують сенсори освітленості та цифрові димери, що регулюють яскравість штучного освітлення в залежності від природного. Наприклад, у приміщенні з південною орієнтацією при високому рівні інсоляції LED-лампи автоматично знижують інтенсивність світла або вимикаються. У дослідженнях J. Bryan та D. Mulville показано, що використання daylight harvesting знижує споживання електроенергії до 40% на рік у порівнянні з класичними системами [8].

Інша група рішень стосується реактивних сценаріїв присутності, коли системи розпізнавання (на основі PIR-датчиків або відеоаналітики) формують карту активності й увімкнення освітлення відбувається лише в активних зонах.

Таблиця 1 – Компоненти, функції та ефекти інтелектуальних систем управління в енергоефективних будівлях (розроблено автором на основі [7])

Компонент системи	Функціональне призначення	Очікуваний ефект
Інтелектуальні системи управління (ISU)	Адаптивне управління енергоспоживанням	Підвищення загальної енергоефективності
Датчики середовища (температура, вологість, CO ₂)	Збір даних про середовище в реальному часі	Точне реагування на зміни середовища
Виконавчі пристрої (заслінки, термостати, реле)	Регулювання кліматичних та світлових умов	Зменшення втрат енергії
Цифрова платформа управління	Логіка керування системами на основі даних	Оптимізація сценаріїв управління
Building Management System (BMS)	Інтегрований контроль HVAC, освітлення, безпеки	Зниження витрат до 25–30%
Модель предиктивного управління	Моделювання стану системи, оптимізація дій	Мінімізація відхилень від цільових параметрів
Алгоритми машинного навчання	Прогнозування ефективності керувальних сценаріїв	Адаптивність до умов і користувацьких патернів
BIM + цифровий двійник	Віддзеркалення енергетичної поведінки об'єкта	Інтеграція фізичних і цифрових параметрів
IoT-комунікація через MQTT/Edge	Трансфер даних від сенсорів до серверів	Швидке реагування без затримок
Аналітичні панелі (PowerBI, SCADA)	Візуалізація та аналітика для прийняття рішень	Аналітична підтримка рішень на основі даних

Особливо ефективним є поєднання освітлення з HVAC-системами, коли, наприклад, за відсутності людей не лише вимикається світло, а й знижується вентиляція. У медичних установах і коворкінгах такі підходи дозволяють створити мікрональні режими управління, при яких кожна частина простору «живе» за власною логікою.

Цифрова основа інтегрованих систем – це IoT-інфраструктура, яка дозволяє з'єднати всі елементи об'єкта (датчики, виконавчі механізми, інтерфейси керування) в єдину мережу. Сучасна архітектура IoT у будівництві спирається на принцип багатшаровості: сенсорний рівень (edge-обладнання), комунікаційний рівень (мережі типу Zigbee, LoRaWAN, KNX), логічний рівень (сервери і брокери MQTT), рівень застосування (вебінтерфейси, мобільні додатки, BMS/EMS-системи).

У межах IoT-середовища можлива реалізація так званих рефлексивних сценаріїв адаптації, коли система самостійно аналізує події та змінює власну поведінку. Наприклад, при прогнозі зниження температури до -5°C система може активувати попередній підігрів будівлі за 2 години до приходу персоналу, враховуючи теплову інерцію матеріалів, режим рекуперації та тарифи на електроенергію в конкретні години.

Окремий напрям – це енергодіагностика та самоперевірка систем, коли інтелектуальні пристрої моніторять не лише стан середовища, а й власну функціональність. Наприклад, сучасні HVAC-

системи мають вбудовані модулі виявлення втрати герметичності або зниження ефективності рекуператора, сигналізуючи про потребу в обслуговуванні. Це не лише зменшує ризики, а й дозволяє проводити перехід від планового до предиктивного сервісу (Predictive Maintenance), що є критично важливим у складних інженерних мережах [9].

Інтеграція цифрових рішень у сучасні енергоефективні будівлі забезпечує не лише енергозбереження, а й гнучкість реагування на зміну умов середовища та поведінки користувачів. На рис. 2 представлено ключові технології, які демонструють найвищу ефективність у рамках концепції Smart Building, зокрема BMS-системи, IoT-архітектура, daylight harvesting та алгоритми машинного навчання. Це дозволяє проєктантам формувати адаптивні системи управління з високим ступенем самонавчання і прогнозування.

Серед проєктів, де успішно реалізовано повноцінну інтеграцію інтелектуальних систем у архітектуру – Powerhouse Brattørkaia (Норвегія), який є першим енергопозитивним офісом у Скандинавії. Його BMS-система інтегрована з BIM-моделлю в реальному часі, а кожен елемент – від жалюзі до сонячних панелей – працює під управлінням предиктивної платформи. Аналогічно, кампус університету Delft (Нідерланди) є прикладом повної адаптації архітектурних рішень до сценаріїв розподіленого управління енергією.

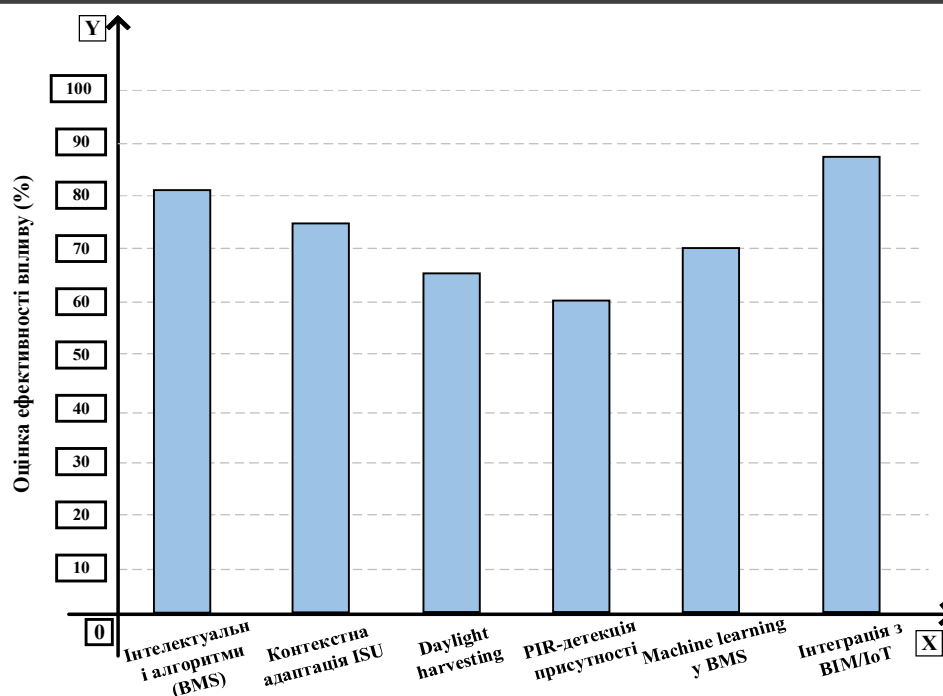


Рисунок 2 – Оцінка ефективності цифрових та інтелектуальних технологій в енергоефективних будівлях
Розроблено автором на основі [9].

Таким чином, еволюція архітектурно-технічних рішень у напрямку цифровізації створює підґрунтя для ще одного фундаментального зрушення – впровадження відновлюваних джерел енергії як невід’ємної частини архітектурної структури. На цьому етапі інтеграція ВДЕ перестає бути факультативною технологією і перетворюється на базову компоненту сталого проектного мислення.

У рамках трансформації будівельної галузі до моделі вуглецево-нейтральної економіки центральним напрямом стало інтегрування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) безпосередньо у технічну архітектуру будівельних проектів. Відновлювана енергетика у цьому контексті перестає бути лише допоміжною інженерною системою й перетворюється на структуроутворюючий елемент проектної архітектури. Розглядаючи ВДЕ як компонент архітектурного рішення, необхідно брати до уваги не лише енергетичну доцільність, а й просторову логіку, естетику, конструктивну узгодженість та технічну адаптацію [10].

Провідним принципом у цьому процесі є BIPV (Building-Integrated Photovoltaics) – інтеграція фотоелементів безпосередньо у фасади, покрівлі, огорожі та елементи благоустрою. Така інтеграція дозволяє не лише виробляти електроенергію, а й зменшувати навантаження на системи охолодження, слугувати елементом затінення, забезпечувати акустичну ізоляцію. Архітектор має оперувати не «додаванням» сонячних панелей до покрівлі, а вбудовуванням фотогенеруючих функцій у саму оболонку. Це вимагає зміни мислення від «енергетичного проєктанта» до архітектора-енергетика.

Розрахунок енергетичного потенціалу BIPV-систем у площинних конструкціях базується на визначенні показника ефективної інсоляції з урахуванням просторової орієнтації поверхонь, що описується залежністю:

$$A_{\text{доб}} = D \times V_t \times \delta \times PN, \quad (4)$$

де $A_{\text{доб}}$ – добове вироблення енергії; D – площа фотоелементів; V_t – горизонтальна глобальна сонячна радіація на м^2 ; δ – ефективність фотоелемента; PN – коефіцієнт продуктивності (втрати на тінь, температуру, інвертор).

Розрахунок цієї формули на етапі архітектурного планування дозволяє оптимізувати орієнтацію об’єкта, кут нахилу покрівлі, глибину навісів і систему сонцезахисту. Зокрема, у дослідженні T. Huld (JRC EU, 2021) наведено карту потенціалу BIPV для Центральної Європи, де середній річний потенціал становить від 800 до 1300 кВт·год/ м^2 . Це означає, що будівля з фасадом у 300 м^2 , орієнтованим на південь, здатна виробляти понад 40 000 кВт·год щороку – цілком достатньо для повного електрозабезпечення середньої школи або офісу. Для практичної реалізації концепції Smart Building важливим є комплексний підхід до вибору технологій, які забезпечують адаптивність, ефективність і сталість функціонування будівлі [11].

У табл. 2 подано основні цифрові та інтелектуальні рішення, їхні принципи дії та очікувані результати впровадження в сучасну архітектурну практику.

Таблиця 2 – Інтелектуальні технології в енергоефективній архітектурі
(розроблено автором на основі [11])

Технологія / рішення	Принцип дії	Очікуваний ефект
PIR-детекція присутності	Реєстрація руху або активності в зоні приміщення	Оптимізація енергоспоживання за рахунок зонального керування
Інтеграція освітлення та HVAC	Увімкнення освітлення/вентиляції лише за присутності людей	Зниження енергозатрат до 30% в нежитлових приміщеннях
IoT-інфраструктура (Zigbee, KNX, MQTT)	Зв'язок між сенсорами, пристроями та керуючими платформами	Синхронізація даних і рішень між усіма цифровими компонентами
Рефлексивні сценарії адаптації	Автоматична реакція системи на зміну зовнішніх умов	Проактивне управління температурою, освітленням, вентиляцією
Predictive Maintenance (самодіагностика)	Моніторинг функціональності обладнання та виявлення збоїв	Зменшення ризиків відмов, перехід до сервісу за потребою
BIM-моделі з BMS	Інтеграція систем управління в 3D-модель будівлі	Моделювання поведінки об'єкта в режимі реального часу
Daylight harvesting	Автоматичне зниження штучного освітлення за високої інсоляції	Скорочення споживання електроенергії до 40% на рік
Building-Integrated Photovoltaics (BIPV)	Вбудовування фотоелементів у фасади/дах із енергетичною функцією	Енергозабезпечення об'єкта + архітектурна функція затінення

Однак ефективне застосування ВДЕ не обмежується сонячною енергетикою. Архітектурні технічні рішення також дедалі активніше включають теплові насоси, які використовують низькопотенціальне тепло з ґрунту, води або повітря. Архітектор має враховувати габарити зон теплообміну, конфігурацію контурів, технічне зонування підсобних приміщень і акумуляторів тепла. Перевага геотермальних рішень у стабільності джерела: на глибині 3 – 5 метрів температура землі тримається на рівні +10...+12°C цілий рік. Відповідно, архітектурне планування фундаменту й технічного підвалу має враховувати закладку контурів теплообміну [12].

Використання систем «ґрунт-вода» є одним із найбільш перспективних методів експлуатації низькопотенційної енергії. Ефективність роботи такої системи оцінюється за допомогою коефіцієнта перетворення енергії (COP), що визначається так:

$$WPF = \frac{T_{\text{корис}}}{C_{\text{спож}}}, \quad (5)$$

де $T_{\text{корис}}$ – теплова енергія, отримана в контурі; $C_{\text{спож}}$ – витрати електроенергії на роботу насоса.

Для сучасних систем $WPF = 3,5 \dots 5,0$ – тобто на 1 кВт електроенергії отримується до 5 кВт тепла.

На рис. 3 відображено ключові компоненти архітектурної інтеграції відновлюваних джерел енергії в сучасні будівельні проекти. Він демонструє взаємозв'язки між концепцією BIPV, інсоляцією, акустичними і тепловими характеристиками будівель, а також впровадженням геотермальних рішень, що формують цілісну систему сталого енергетичного мислення.

Особливе місце в архітектурі технічних рішень займає рекуперація тепла – відновлення енергії, втрачаємої через вентиляцію. Системи з перехресним

теплообміном вбудовуються в шахти або міжповерхові колектори й дозволяють повертати до 80% теплового потоку з відпрацьованого повітря. Архітектор повинен проектувати систему внутрішнього повітрообміну з урахуванням трас прокладення, вільного доступу до обслуговування, уникнення шумових зон. На відміну від класичних каналів вентиляції, рекупераційні траси мають бути прямими, із мінімальною кількістю вигинів, що передбачає принцип вентиляційної геометрії, закладеної ще на етапі архітектурного ескізу.

Висновки

Результати проведеного аналізу доводять, що архітектура технічних рішень у проектах із підвищеними вимогами до енергоефективності є комплексним міждисциплінарним процесом, у якому архітектурна форма, матеріали, інженерні системи та цифрові технології функціонують як єдиний інтегрований механізм. Виявлено, що основою енергоефективної будівлі є енергетична оболонка, здатна адаптуватися до кліматичних умов і режимів експлуатації завдяки поєднанню пасивних і активних стратегій.

Ключовим фактором підвищення ефективності є інтеграція цифрових систем – BMS, BIM, IoT, Machine Learning, – які забезпечують перехід від реактивного управління до предиктивного. Це дозволяє будівлі «навчатися» на основі даних, прогнозувати поведінку систем і оптимізувати споживання енергії в реальному часі.

У цьому контексті архітектор виступає не лише проектувальником, а й системним аналітиком, що керує інформаційними потоками між фізичним і віртуальним середовищами.

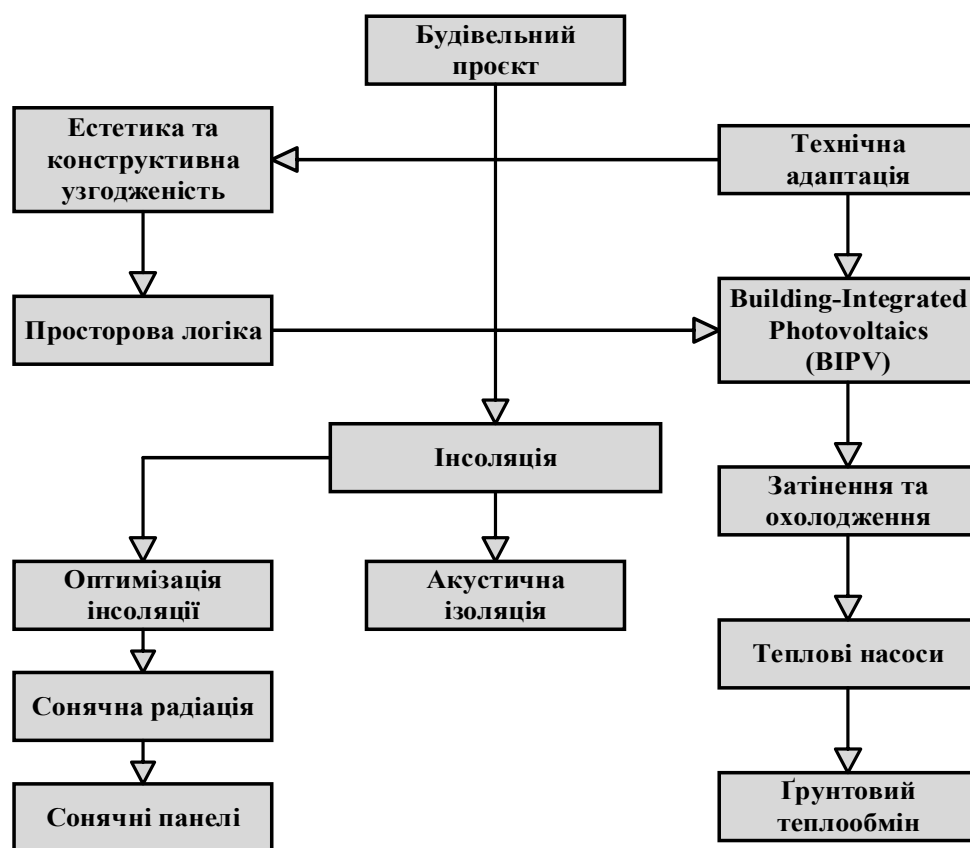


Рисунок 3 – Структура інтеграції відновлюваних джерел енергії в архітектурні рішення будівель
Розроблено автором на основі [12].

Особливу роль у підвищенні енергоефективності відіграють відновлювані джерела енергії (ВДЕ), інтегровані безпосередньо в архітектурну структуру будівлі: BIPV-фасади, геотермальні контури, рекупераційні системи та теплові насоси. Їхнє ефективне поєднання з архітектурною геометрією дозволяє не лише знизити енергозалежність, а й впровадити архітектурно виразні рішення, у яких енергетика стає частиною естетики.

Застосування таких інтегрованих компонентів перетворює пасивну оболонку будівлі на активну генеруючу систему, що здатна самостійно забезпечувати власні енергетичні потреби. Це створює передумови для формування нової

візуальної мови архітектури, де технічні елементи сталого розвитку виступають головними композиційними акцентами.

Підсумовуючи, можна констатувати, що енергоефективна архітектура XXI століття базується на тріаді адаптивності, інтелектуальності та сталості. Вона визначає перехід до проектування об'єктів як динамічних систем, здатних не лише мінімізувати вуглецевий слід, а й автономно підтримувати комфортне середовище у відповідь на зовнішні виклики. Така парадигма трансформує будівельну галузь у глобальну цифрову екосистему, де кожна будівля перетворюється з пасивного споживача на активного та інтелектуального учасника енергетичного балансу сучасного міста.

Список літератури

1. Gu Z. Approaches to Energy Efficient Building Development – Studying under Chinese Contexts : Licentiate Thesis / KTH. Stockholm, 2007. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A12731/FULLTEXT01.pdf> (дата звернення: 26.01.2026).
2. A review of building integrated photovoltaic: Case study of tropical region / Monash University. URL: https://research.monash.edu/files/353231855/345079312_oa.pdf (дата звернення: 26.01.2026).
3. Energy Efficiency in Commercial Buildings : ESRU, MSc thesis. URL: https://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc_2004/elsadig.pdf (дата звернення: 26.01.2026).
4. Schmidt M., Åhlund C. Smart buildings as Cyber-Physical Systems: Data-driven predictive control strategies for energy efficiency. *arXiv*. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1807.06084> (дата звернення: 26.01.2026).

5. Бахтін Д. С. Принципи формування об'ємно-просторової організації енергоефективних громадських будівель : автореф. дис. ... канд. архіт. Одеса : ОДАБА, 2023. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0823U101952> (дата звернення: 26.01.2026).
6. Кузнєцова Я. Ю. Архітектурне формоутворення природоінтегрованих об'єктів : монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. URL: <https://surl.li/udaoar> (дата звернення: 26.01.2026).
7. Digital Administration of the Project Based on the Concept of Smart Construction / D. Chernyshev et al. *Explore Business, Technology Opportunities and Challenges After the Covid-19 Pandemic*. 2023. Vol. 495. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-08954-1_53 (дата звернення: 26.01.2026).
8. Овчаренко Е. О. Енергоефективність будівель у системі національного законодавства : магістерська дис. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/0c388b7a-d24a-49a4-8eac-315c1de7d683/download> (дата звернення: 26.01.2026).
9. Chupryna I. et al. Scientific and methodological approaches to risk management of clean energy projects implemented in Ukraine on the terms of public-private partnership. *2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*. 2022. DOI: 10.1109/SIST54437.2022.9945731.
10. Карюк А. М. та ін. Енергоефективність будівель у країнах Євросоюзу та Україні. Полтава : ПолтНТУ, 2019. URL: <https://surl.li/zxhqty> (дата звернення: 26.01.2026).
11. Burmaka V. et al. Energy efficiency of modernization of translucent building envelope structures. *Journal of Engineering Sciences and Eco-Management*. 2021. Vol. 7(2). URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2021/dec/25986/jeees-07-02-2021-paper02.pdf> (дата звернення: 26.01.2026).
12. Бурлак Г. М. Енергозбереження в архітектурі та містобудуванні : навч. посібник. Одеса : ОДАБА, 2023. URL: https://odaba.edu.ua/upload/files/191_ABSnm_Energozberezhennya_v_arhitekturi_ta_mistobuduvanni.pdf (дата звернення: 26.01.2026).

Стаття надійшла до редколегії 19.11.2025

Sobol Denys

Postgraduate student of the Department of Construction Management,

<https://orcid.org/0000-0001-9986-9520>

Kyiv National University of Construction and Architecture

ARCHITECTURE OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR PROJECTS WITH INCREASED ENERGY EFFICIENCY REQUIREMENTS

Abstract. Modern trends in architecture and construction are increasingly focusing on enhancing energy efficiency, environmental sustainability, and the digital transformation of design processes. Rising energy consumption in urban environments, higher comfort standards, and the urgent need to reduce carbon footprints stimulate the search for new approaches to architectural and technical solutions. This paper examines the principles of creating energy-efficient buildings where architectural form, structural systems, and digital technologies act as a single integrated platform for energy flow management. The primary focus is on combining passive and active energy-saving strategies – from building orientation for insolation, natural ventilation, and thermal inertia of materials to the use of intelligent control systems such as BMS, IoT, daylight harvesting, and predictive maintenance. The role of digital twins and BIM models in creating adaptive architecture capable of responding to changes in climatic conditions and operational parameters in real-time is analyzed separately. Modern engineering solutions integrating renewable energy sources – BIPV, geothermal systems, and recovery circuits – into the building envelope are also considered. This approach forms a new architectural paradigm where technical solutions serve not only as a means of energy saving but also as a vital element of aesthetics, sustainable development, and digital system interaction. A key aspect is the integration of Smart Building approaches that combine sensors, analytics, and adaptive climate control into a single information system. This creates the prerequisites for new architectural design standards, where a building is viewed as a "living organism" interacting with the environment, the user, and urban infrastructure to ensure stability, efficiency, and comfort.

Keywords: energy efficiency; architectural and technical model; Smart Building; BMS; BIM; digital twin; BIPV; ventilation; sustainable development

References

1. Gu, Z. (2007). *Approaches to energy efficient building development – Studying under Chinese contexts* (Licentiate Thesis). KTH Royal Institute of Technology. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A12731/FULLTEXT01.pdf>
2. Monash University. (n.d.). *A review of building integrated photovoltaic: Case study of tropical region*. https://research.monash.edu/files/353231855/345079312_oa.pdf
3. ESRU. (2004). *Energy efficiency in commercial buildings* (MSc thesis). University of Strathclyde. https://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc_2004/elsadig.pdf

4. Schmidt, M., & Åhlund, C. (2018). Smart buildings as cyber-physical systems: Data-driven predictive control strategies for energy efficiency. *ArXiv*. <https://arxiv.org/abs/1807.06084>
5. Bakhtin, D. S. (2023). *Principles of formation of spatial organization of energy-efficient public buildings* (PhD Thesis abstract). Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. <https://uacademic.info/ua/document/0823U101952>
6. Kuznietsova, Ya. Yu. (2020). *Architectural shaping of nature-integrated objects* (Monograph). O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. <https://surl.li/udoaap>
7. Chernyshev, D., Ryzhakova, G., Honcharenko, T., Petrenko, H., Chupryna, I., & Reznik, N. (2023). Digital administration of the project based on the concept of smart construction. In B. Alareeni & A. Hamdan (Eds.), *Explore Business, Technology Opportunities and Challenges After the Covid-19 Pandemic. Lecture Notes in Networks and Systems*, 495. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08954-1_53
8. Ovcharenko, E. O. (2019). *Energy efficiency of buildings in the system of national legislation* (Master's thesis). Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. <https://ela.kpi.ua/bitstreams/0c388b7a-d24a-49a4-8eac-315c1de7d683/download>
9. Chupryna, I., Tormosov, R., Abzhanova, D., Gonchar, V., & Plys, N. (2022). Scientific and methodological approaches to risk management of clean energy projects implemented in Ukraine on the terms of public-private partnership. *2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*. <https://doi.org/10.1109/SIST54437.2022.9945731>
10. Kariuk, A. M., Mishchenko, R. A., Pents, V. F., & Shchepak, V. V. (2019). *Energy efficiency of buildings in the European Union and Ukraine*. Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. <https://surl.li/zxhqty>
11. Burmaka, V., Tarasenko, M., Kozak, K., Burmaka, O., & Sabat, N. (2021). Energy efficiency of modernization of translucent building envelope structures. *Journal of Engineering Sciences and Eco-Management*, 7 (2). <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2021/dec/25986/jeeecs-07-02-2021-paper02.pdf>
12. Burlak, H. M. (2023). *Energy saving in architecture and urban planning*. Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. https://odaba.edu.ua/upload/files/191_ABSnm_Energozberezhennya_v_arhitekturi_ta_mistobuduvanni.pdf

Посилання на публікацію

- | | |
|------|--|
| APA | Sobol, D. (2025) Architecture of technical solutions for projects with increased energy efficiency requirements. <i>Management of Development of Complex Systems</i> , 64, 206–216, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2025.64.206-216. |
| ДСТУ | Соболь Д. В. Архітектура технічних рішень для проєктів із підвищеними вимогами до енергоефективності. <i>Управління розвитком складних систем</i> . Київ, 2025. № 64. С. 206 – 216, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2025.64.206-216. |