

ЦИФРОВІ ІНСТРУМЕНТИ МОНІТОРИНГУ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА СУПРОВОДУ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЕНЕРГОАДАПТОВАНИХ БУДІВЕЛЬНИХ РІШЕНЬ

Розглянуто сучасні цифрові інструменти, що допомагають керувати життєвим циклом енергоефективних будівель. Описано, як поєднання сенсорних систем, хмарних сервісів, аналітичних платформ і цифрових двійників створює єдину систему управління, яка дозволяє будівлям самостійно реагувати на зміни середовища. Такі рішення забезпечують безперервний обмін інформацією між усіма етапами – від проєктування до експлуатації, що дозволяє своєчасно виявляти відхилення, планувати технічне обслуговування та прогнозувати споживання енергії.

Запропоновано модель, що об'єднує три основні процеси – моніторинг, моделювання та цифровий супровід. Моніторинг дає змогу в режимі реального часу відстежувати стан технічних систем, фіксувати показники мікроклімату, рівень споживання енергії, температуру, вологість і роботу обладнання. Моделювання забезпечує можливість аналізувати отримані дані, будувати прогнози, оцінювати ефективність рішень і розробляти сценарії енергоспоживання з урахуванням зовнішніх факторів. Цифровий супровід, у свою чергу, забезпечує постійний зв'язок між реальним об'єктом і його віртуальною копією – цифровим двійником, який дозволяє проводити аналіз «що-якщо» (what-if analysis) та приймати рішення на основі точних симуляцій.

Окремо наголошено на користі аналітичних програм Power BI, Tableau та Qlik, що дозволяють об'єднувати дані з різних джерел, будувати інтерактивні панелі управління та створювати зрозумілі візуальні моделі для керівників і технічного персоналу. На основі цих інструментів розроблено систему ключових показників ефективності (KPI), яка охоплює енергетичні, технічні, економічні та екологічні аспекти функціонування будівлі.

Використання цифрових технологій дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління, коли система не лише реагує на події, а й передбачає їх. Це дає змогу знизити витрати на енергію, продовжити термін служби обладнання, підвищити комфорт користувачів і забезпечити стабільну роботу будівель. Такий підхід сприяє формуванню нової філософії управління в будівництві, орієнтованої на сталий розвиток, енергозбереження й ефективну взаємодію між людиною, технологією та середовищем. Цифрові інструменти стають не просто засобом автоматизації, а основою інтелектуального управління будівлями у цифрову епоху.

Ключові слова: *енергоадаптивні будівлі, цифровий моніторинг, життєвий цикл, цифровий двійник, BIM, SCADA, енергоефективність, Business Intelligence.*

Вступ. Цифрова трансформація будівельної галузі змінює традиційне розуміння управління об'єктами, перетворюючи будівлі на активні інформаційні системи. У контексті глобальної енергетичної кризи та необхідності сталого розвитку цифрові технології стають основою нового типу управління – адаптивного, аналітичного та самонавчального. Моніторинг, моделювання та супровід життєвого циклу об'єкта є фундаментом енергоадаптивного будівництва. Його мета полягає у створенні системи, здатної не лише відображати поточний стан будівлі, а й прогнозувати сценарії її поведінки у відповідь на зміну зовнішніх факторів. Такі системи інтегрують різноманітні джерела даних – сенсорні показники, технічну документацію, економічні параметри, кліматичні дані – в єдину цифрову модель управління. Завдяки цьому забезпечується безперервність інформаційних потоків між фазами «планування–будівництво–експлуатація–модернізація». Важливою рисою є створення цифрового двійника об'єкта, який відображає його фізичний стан у режимі реального часу. Така модель дозволяє проводити глибокий аналіз KPI, оптимізувати енерговитрати, прогнозувати термін служби систем і визначати економічну доцільність модернізацій.

Актуальність теми зумовлена переходом будівельної галузі від реактивного управління до концепції data-driven management, заснованої на аналізі великих даних, автоматизації процесів і когнітивних технологіях. У сучасних умовах будівлі мають функціонувати як саморегульовані системи, що забезпечують оптимальне співвідношення енергоспоживання, комфорту та економічної ефективності. Наявність точних цифрових інструментів дозволяє не лише контролювати поточні процеси, але й створювати передбачувані моделі реагування. Це стає критично важливим для об'єктів з підвищеною енергоадаптивністю, де навіть незначні коливання зовнішніх факторів можуть призвести до суттєвих відхилень у витратах або ефективності систем. Водночас цифрові технології стають не лише засобом автоматизації, а й основою для стратегічного планування, прогнозування життєвого циклу будівлі та прийняття рішень на основі аналітичних даних.

Постановка проблеми. Проблематика полягає у відсутності комплексної моделі цифрової інтеграції, що дозволяє об'єднати моніторинг, моделювання та супровід життєвого циклу енергоадаптивних будівельних систем. Більшість існуючих рішень зосереджені на окремих етапах — проектуванні або експлуатації — без урахування безперервності аналітичного контуру. Це призводить до фрагментарності даних, втрати контексту рішень і зниження ефективності енергоменеджменту. Необхідність полягає у створенні єдиної цифрової екосистеми, здатної забезпечити автоматизовану взаємодію між сенсорними системами, аналітичними платформами та управлінськими інструментами. Розв'язання цієї проблеми дозволить перейти від лінійних схем контролю до замкнених інтелектуальних систем, що підтримують безперервну оптимізацію процесів протягом усього життєвого циклу будівлі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Сучасні дослідження (Fuller, Fan, Barlow; Ciuru, Frunzulica; NIH, EPRS) акцентують увагу на впровадженні цифрових двійників і штучного інтелекту у процеси управління енергоефективністю. Науковці розглядають ці інструменти як основу для створення “розумних” будівель, здатних до самоаналізу й адаптації. Однак більшість праць фокусується на технічних аспектах і не охоплює повний життєвий цикл будівельного об'єкта – від проектування до утилізації. Недостатньо вивченими залишаються питання

інтеграції BI-аналітики з системами BMS, SCADA, EMS у рамках єдиної інформаційної архітектури. Відсутність єдиної методології для оцінювання ефективності цифрових інструментів (через KPI, ROI, LCA) ускладнює впровадження цих рішень на практиці. Саме тому необхідно розробити цілісну модель цифрової підтримки життєвого циклу енергоадаптивних будівель, що поєднує технічну, аналітичну та управлінську складові.

Метою статті є розроблення концептуальної моделі цифрових інструментів моніторингу, моделювання та супроводу життєвого циклу енергоадаптивних будівельних рішень. Завдання дослідження полягає у визначенні архітектури взаємодії сенсорних систем, аналітичних платформ і керуючих модулів, а також у формуванні системи KPI для оцінювання ефективності таких рішень. Розроблена модель має забезпечити інтегроване управління енергоспоживанням, прогнозування технічного стану будівель і підвищення стійкості об'єктів до зовнішніх факторів. Очікуваним результатом є формування методологічної бази для впровадження data-driven підходу у цифрову інфраструктуру сталого будівництва.

Виклад основної інформації. У сучасному будівництві дедалі більшого значення набуває не лише зведення будівельних об'єктів, а й формування їхньої довгострокової енергоефективності, адаптивності до змін середовища та цифрової інтеграції в управлінські процеси. У цьому контексті виникає потреба у впровадженні комплексних цифрових інструментів, які здатні забезпечити моніторинг, аналітичне моделювання та супровід життєвого циклу будівлі – від початкового проєктування до експлуатації та модернізації. Цифрова трансформація цього процесу охоплює нові архітектури управління даними, розширення функцій інформаційних систем, а також систематизацію енергетичних і технологічних показників, що є критично важливими в умовах переходу до сталого будівництва.

Особливе місце в цьому процесі посідають енергоадаптовані будівельні рішення, які ґрунтуються на принципах реактивної взаємодії з навколишнім середовищем – таких як автоматизована вентиляція, розумне освітлення, управління кліматом на основі поведінкових сценаріїв користувачів тощо. Їхня ефективність напряму залежить від якості цифрового супроводу: наскільки точно і вчасно будівельна система здатна реагувати на зміни температури, вологості, навантаження або інших зовнішніх і внутрішніх факторів. З цієї метою застосовуються сенсорні мережі IoT, SCADA-платформи, BIM-середовища, а також інструменти Big Data та Business Intelligence, що дозволяють будувати передбачувані моделі функціонування об'єкта та ухвалювати обґрунтовані управлінські рішення [1].

Моніторинг у цифровому середовищі перестає бути суто контрольним інструментом і перетворюється на активну складову процесного управління. Завдяки впровадженню систем реального часу, цифрові платформи здатні ідентифікувати відхилення, передбачати збої, ініціювати технічні або адміністративні дії на основі заздалегідь запрограмованих сценаріїв. У поєднанні з інструментами цифрового моделювання – зокрема BIM, Revit, Twinmotion, EnergyPlus або Green Building Studio – відкривається можливість не лише візуалізувати майбутню будівлю, а й змодельовати її енергетичну поведінку в різних кліматичних та експлуатаційних умовах. Таке моделювання стає основою для ухвалення рішень на етапі проєктування, що значно знижує ризики у майбутньому та підвищує економічну обґрунтованість будівництва.

Супровід життєвого циклу в цифровому форматі означає побудову єдиного інформаційного простору, де всі етапи – планування, будівництво, задача в експлуатацію, технічне обслуговування та оновлення — інтегруються в логічну й аналітичну систему. Завдяки впровадженню платформ типу BMS (Building Management Systems), ERP-систем у поєднанні з BI-модулями (наприклад, Power BI, Tableau), відбувається створення так званого "цифрового двійника" об'єкта, який у режимі реального часу дозволяє спостерігати, управляти та оптимізувати всі ключові показники [13]. Таким чином, цифрові інструменти перетворюються на головний засіб реалізації концепції сталого будівництва, де ефективність, безпечність, адаптивність та економічність не є результатом фінального аудиту, а постійно підтримуються завдяки гнучким технологіям аналізу та управління.

За такого підходу цифрові інструменти стають не лише технічним засобом, а й методологічною платформою для зміни всієї логіки реалізації будівельного проєкту. У межах цієї логіки традиційні розриви між фазами будівництва зникають, натомість формується безперервний аналітичний цикл, де рішення приймаються на основі даних, що генеруються самою будівлею. Це, своєю чергою, забезпечує значно вищий рівень готовності об'єкта до змін, стійкість до зовнішніх впливів та відповідність сучасним критеріям енергоефективності. Наступні розділи буде присвячено поглибленому аналізу функцій цифрового моніторингу, практик моделювання та алгоритмів супроводу життєвого циклу енергоадаптованих будівельних рішень.

Енергоадаптивне будівництво в умовах цифрової трансформації розглядається як системна концепція, яка поєднує принципи сталого розвитку, енергоефективності та технологічної чутливості об'єктів до змін зовнішнього і внутрішнього середовища. На відміну від традиційних моделей управління енергоспоживанням, енергоадаптивні підходи передбачають активну реакцію систем будівлі на коливання кліматичних, експлуатаційних або поведінкових факторів. Це означає не лише зменшення споживання енергоресурсів, а й забезпечення адаптаційної логіки — коли сама будівля, її конструктивні елементи та інженерні системи здатні змінювати режим функціонування у відповідь на нові умови.

Теоретико-методологічна основа цифрового моніторингу в такому будівництві ґрунтується на взаємозв'язку між трьома головними складовими: даними (Data), інтерпретацією (Analytics) та дією (Actuation). Згідно з цією логікою, цифрові сенсори фіксують вхідні сигнали про стан середовища – температуру, вологість, тиск, рівень CO₂, рівень освітлення, вібрації, а також поведінку користувачів (кількість людей у приміщенні, час перебування, траєкторії руху). Ці сигнали обробляються аналітичними модулями (BI-системи, алгоритми прогнозування, машинне навчання), після чого надходять до виконавчих блоків — систем опалення, вентиляції, освітлення або керування навантаженням, які коригують свої параметри у реальному часі [2].

Одним із ключових інструментів, що забезпечує функціонування такої системи, є сенсорні мережі з протоколами IoT, які працюють як у дротовому, так і у бездротовому форматах (LoRaWAN, Zigbee, NB-IoT). Завдяки цим протоколам можна досягти глибокої деталізації даних навіть у розгалужених об'єктах – від житлових будинків до інфраструктурних комплексів. Інформація, отримана з таких сенсорів, передається до SCADA-систем (Supervisory Control and Data Acquisition) або BMS-платформ (Building Management Systems), які виступають інтеграторами

та диспетчерськими центрами. Саме ці системи дозволяють централізовано аналізувати стан об'єкта, прогнозувати пікові навантаження, ідентифікувати критичні відхилення або планувати профілактичне обслуговування [3].

Сутність цифрового моніторингу в енергоадаптивному будівництві полягає не в одноразовому контролі, а в створенні континууму вимірювання, де інформація оновлюється з високою частотою і використовується як в короткостроковому, так і в довгостроковому стратегічному управлінні. У цьому контексті формуються дві моделі цифрового моніторингу: оперативна (real-time monitoring) і предиктивна (predictive monitoring). Перша забезпечує миттєве реагування на відхилення та нештатні ситуації, друга – дозволяє через історичні дані, моделі прогнозування й аналітичні панелі оцінювати майбутню поведінку об'єкта, формувати плани термореновації або оптимізації [2].

Інфраструктура цифрового моніторингу також передбачає багаторівневу архітектуру – від рівня фізичних сенсорів і локальних контролерів до хмарних платформ з API-інтеграціями, де проводиться централізований аналіз на основі наборів KPI: середнє споживання, пік навантаження, частота спрацьовування аварійного режиму, теплові втрати через огорожувальні конструкції тощо. Енергоадаптивні об'єкти, які функціонують на основі таких систем, демонструють не лише вищу енергоефективність, а й стабільність в умовах зовнішніх змін – наприклад, температурних коливань, змін тарифної політики чи дефіциту ресурсів [3].

Для наочного представлення структурної логіки цифрового моніторингу в енергоадаптивному будівництві представлено рис. 1, яка ілюструє взаємозв'язок між сенсорними пристроями, цифровими платформами обробки даних та виконавчими системами управління. Вона відображає ключові етапи інформаційного потоку – від вимірювання параметрів середовища до автоматизованої дії – що є основою енергоадаптивного реагування в будівельному середовищі.

Експлуатаційна фаза життєвого циклу будівельного об'єкта є завершальною, але водночас найбільш тривалою і ресурсноємною складовою функціонування будь-якої інженерної системи. Вона охоплює період від моменту введення будівлі в експлуатацію після завершення будівельно-монтажних робіт і до її модернізації, реконструкції або виведення з обігу. У межах цієї фази здійснюється забезпечення безперебійної роботи всіх конструктивних та інженерних підсистем об'єкта, контроль за технічним станом, обслуговування, ремонт, а також аналіз ефективності використання ресурсів – енергетичних, матеріальних, водних, логістичних. Основними завданнями експлуатаційної фази є підтримання належного технічного стану об'єкта, безпечного середовища для перебування користувачів, забезпечення нормативного рівня комфорту (температура, вологість, освітлення, вентиляція), а також мінімізація витрат через раціональне використання ресурсів [4]. Особливої актуальності ці завдання набувають в умовах функціонування енергоадаптивних будівель, де точність, адаптивність і швидкість реагування систем прямо впливають на енергоспоживання, екологічні характеристики та тривалість безаварійної експлуатації.



Рис. 1. Архітектура цифрового моніторингу енергоадаптивного об'єкта
(розроблено автором на основі [2])

Ця фаза є найдовшою і водночас найвитратнішою в життєвому циклі будівельного об'єкта, саме тому ефективне її супроводження потребує точного, автоматизованого й адаптивного цифрового управління [14]. Сучасні цифрові платформи, дашборди та аналітичні панелі трансформують підходи до обслуговування будівель, забезпечуючи не лише моніторинг поточних параметрів, а й виявлення відхилень, прогнозування майбутніх навантажень, прийняття рішень у режимі реального часу та оптимізацію ресурсів. Замість реактивного втручання у випадку збоїв, цифрові рішення дозволяють сформувати превентивну модель супроводу, яка орієнтована на запобігання ризикам, зниження втрат і підвищення енергоефективності.

Ключовим елементом такої системи є автоматизовані панелі моніторингу, що об'єднують дані з усіх підсистем об'єкта: опалення, вентиляції, кондиціонування, водопостачання, електрики, безпеки, навантаження тощо. Завдяки IoT-архітектурі та хмарним платформам (на кшталт AWS IoT, Microsoft Azure Digital Twins, Siemens Desigo CC) ці панелі можуть бути інтегровані в загальносистемні дашборди управління, доступні адміністрації об'єкта, операторам та сервісним підрядникам [5]. Така візуалізація дозволяє контролювати енерговитрати, споживання ресурсів, справність систем у реальному часі, а також виводити ключові KPI, порівнюючи їх із нормативними чи прогностичними значеннями.

Важливою інновацією експлуатаційного супроводу є інтеграція прогностичних модулів, які дозволяють на основі історичних даних і моделей машинного навчання передбачати пікові навантаження, потенційні збої, зношення обладнання або зміну поведінки користувачів. Наприклад, у разі погіршення погоди система може

автоматично активувати додаткове обігрівання певних зон, перевірити стан герметизації вікон або запустити режим енергозбереження. Системи типу Energy Management Systems (EMS), які використовуються у поєднанні з BI-інструментами (Power BI, Qlik, Tableau), дозволяють формувати динамічні сценарії управління, ураховуючи зовнішні фактори – кліматичні зміни, зміну тарифів, очікувану кількість відвідувачів тощо.

У центрі цієї архітектури перебуває інтелектуальний аналітичний дашборд, що синтезує великі обсяги даних у зрозумілі графіки, сигнали, звіти й алгоритми дій. Дашборди поділяються на стратегічні (для керівників і власників об'єктів), оперативні (для диспетчерів і технічного персоналу) та аналітичні (для фахівців з енергоаудиту, технічного обслуговування, планування оновлень). Їх використання дозволяє не лише управляти поточним функціонуванням будівлі, а й коригувати стратегії її модернізації, розробляти інвестиційні програми, обґрунтовувати заходи енергоефективності.

Інтеграція цифрових систем у експлуатаційну фазу створює нову якість управління будівельними об'єктами – з підвищеною точністю, передбачуваністю, адаптивністю та прозорістю [5]. Для систематизації інструментів, які використовуються на цьому етапі, нижче наведено таблицю 1 з прикладами платформ, функцій і ефектів від їх застосування.

Таблиця 1

Цифрові інструменти супроводу експлуатаційної фази енергоадаптивних будівель (розроблено автором на основі [5])

<i>Інструмент / платформа</i>	<i>Функціональне призначення</i>	<i>Приклад застосування</i>	<i>Ефекти</i>
BMS (Building Management System)	Централізоване управління інженерними системами об'єкта	Desigo CC, Honeywell EBI	Автоматизація, скорочення витрат на обслуговування
SCADA-системи	Моніторинг та диспетчеризація технологічних процесів	Ignition, WinCC	Реакція на аварійні ситуації в реальному часі
BI-дошки (аналітичні дашборди)	Аналітика енерговитрат і продуктивності систем	Power BI, Tableau	Виявлення втрат, планування оптимізації
EMS (Energy Management System)	Управління енерговитратами та формування сценаріїв енергоспоживання	Schneider EcoStruxure, Energy Star Portfolio Manager	Зменшення пікових навантажень, енергозбереження
CMMS (управління техобслуговуванням)	Планування ремонтів, облік зношування, контроль витрат	Archibus, UpKeep	Профілактика збоїв, оптимізація графіків сервісу
Прогнозні модулі (AI/ML)	Предбачення відмов, оцінка ефективності майбутніх дій	Azure AI, IBM Watson IoT	Зниження аварійності, підтримка управлінських рішень
API-інтеграції з погодними сервісами	Динамічна адаптація режимів будівлі до кліматичних умов	Open WeatherMap API, Climacell	Прогнозування змін і автоматичне переналаштування

Наведена класифікація цифрових інструментів демонструє, як цифрові платформи впливають на ефективність експлуатаційного етапу життєвого циклу енергоадаптивного об'єкта. Від моніторингу в реальному часі до прогнозової аналітики – усі ці технології формують стійку цифрову інфраструктуру управління, що забезпечує максимальну продуктивність та мінімальні втрати.

Зазначимо також, що управління енергоефективністю сучасних будівельних об'єктів дедалі більше набуває характеристик даних, які потребують складної інтерпретації, багатофакторного аналізу та гнучкої адаптації до змін середовища. Інтеграція цифрових рішень у процес прийняття управлінських рішень дозволяє перетворити фрагментовані, нефільтровані потоки інформації на обґрунтовані сценарії дій. Особливо це стосується об'єктів енергоадаптивного типу, для яких точність, швидкість і аналітична глибина прийняття рішень мають визначальне значення як у короткотерміновій експлуатації, так і в довгостроковій стратегії модернізації [6].

Центральне місце в цій інтеграції займають системи Business Intelligence (BI), які об'єднують дані з десятків або сотень сенсорів, технічних блоків, комунальних показників, параметрів навколишнього середовища та поведінки користувачів. За допомогою платформ типу Power BI, QlikView, Tableau або Google Data Studio формується аналітичний ландшафт, що дозволяє не лише візуалізувати критичні індикатори, а й встановлювати залежності між ними, розраховувати тренди, сценарії розвитку, виявляти аномалії.

Одним із ключових напрямів такої аналітики є KPI-індикатори енергоефективності. Це не лише базові показники (як-от споживання електроенергії на квадратний метр площі), а й комплексні інтегровані метрики – частота перевищення порогових значень температури в приміщеннях, тривалість роботи системи HVAC у піковому режимі, втрати тепла через огорожувальні конструкції, динаміка споживання у прив'язці до зовнішніх умов. Коли такі дані поєднуються з погодинною інформацією про температуру, вологість, кількість людей у приміщенні або навіть тарифи на електроенергію – створюється унікальний аналітичний простір для прийняття рішень [7].

Цифрові сенсорні панелі та дашборди, з'єднані в одну систему BI, надають змогу не лише спостерігати за поточним станом об'єкта, а й моделювати різні варіанти реагування. Наприклад, якщо система фіксує зниження ефективності вентиляції при зростанні вологості, вона може автоматично запропонувати сценарій її адаптації або вказати на необхідність технічного огляду. У випадку перегріву окремих приміщень – формується попередження про неефективність розподілу теплового навантаження. Усі ці сигнали можуть відображатися як у вигляді інтерактивних графіків, так і в форматі дійових інструкцій або автоматично активованих процесів через API інтеграцію з BMS-системами. Наведемо рис. 2, який візуалізує взаємодію BI-платформ, сенсорних панелей, KPI-індикаторів та управлінських сценаріїв у контексті ухвалення рішень щодо енергоефективності.

У випадках стратегічного планування (наприклад, термомодернізації будівлі, впровадження нових матеріалів, модернізації систем кондиціонування) BI-аналітика дозволяє змоделювати ефект від впровадження кожного рішення, визначити точку рентабельності, період окупності, екологічний ефект та взаємозв'язок із нормативними вимогами. Таким чином, цифрові системи стають не лише джерелом інформації, а повноцінним інструментом data-driven management, який забезпечує стійкість об'єкта, оптимізацію ресурсів і підзвітність усіх процесів у межах експлуатаційного циклу.

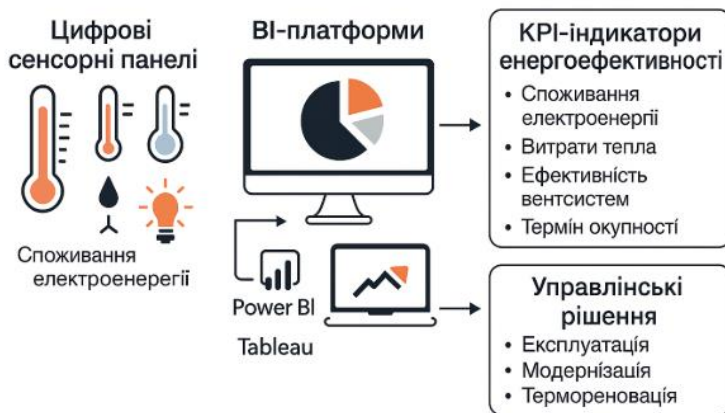


Рис. 2. Цифрова аналітика в системі управління енергоефективністю
(розроблено автором на основі [7])

Також інформаційне забезпечення життєвого циклу енергоадаптивного будівельного об'єкта базується на складній багаторівневій архітектурі цифрової взаємодії, у якій кожен модуль виконує специфічну роль, формуючи єдину безперервну екосистему прийняття рішень. Ця архітектура охоплює повний контур: від фізичних сенсорів, що реєструють динаміку середовища та поведінку користувачів, до систем аналітики, хмарного зберігання та виконавчих механізмів, які реалізують реакцію на основі інтерпретованих даних.

Першим рівнем є сенсорна мережа, яка охоплює датчики температури, вологості, CO₂, освітленості, шуму, вібрації, а також інфрачервоні лічильники присутності та навантаження. У межах енергоадаптивного підходу особливо важливими є мультисенсорні пристрої, здатні синхронно збирати кілька типів даних для зменшення затримок у прийнятті рішень [8]. Дані з таких сенсорів передаються до локального контролера або безпосередньо в дата-хаб – вузол первинної агрегації даних. Тут відбувається фільтрація шумів, формування пакетів, застосування базових алгоритмів порогового реагування (наприклад, аварійного сповіщення при перевищенні допустимих значень).

Наступний рівень – хмарна інфраструктура. Дані передаються через MQTT, HTTPS або AMQP-протоколи у централізовану систему зберігання та обробки (Amazon Web Services, Microsoft Azure, Google Cloud IoT). У хмарі здійснюється зберігання великих обсягів інформації, інтеграція з зовнішніми джерелами (погодні сервіси, тарифні бази, геолокаційні дані) та запуск аналітичних модулів. Саме на цьому рівні починає діяти ядро цифрового супроводу: ВІ-алгоритми, моделі прогнозування, сценарні симуляції, машинне навчання для оптимізації рішень [8].

Аналітична панель – це інтерфейсна оболонка, через яку технічні спеціалісти, менеджери експлуатації, проєктні аналітики та власники об'єктів отримують доступ до реальних та історичних показників. У панелі виводяться інтерактивні графіки, теплові мапи, КРІ-індикатори, сигнали тривоги, а також рекомендації щодо подальших дій. Модулі типу Power BI, Tableau, Zoho Analytics можуть бути

кастомізовані під кожну роль у системі, забезпечуючи багаторівневу персоналізацію та контроль доступу.

На останньому рівні знаходяться виконавчі органи: системи керування мікрокліматом, освітленням, вентиляцією, доступом, безпекою. Вони реалізують інструкції, які надходять від аналітичних платформ через інтегровані API [8]. Відбувається або автоматичне спрацювання (наприклад, увімкнення аварійного провітрювання при перевищенні рівня CO₂), або напівавтоматичне – з участю диспетчера, якому система рекомендує оптимальні параметри.

Цифрова архітектура супроводу також вимагає дотримання стандартів обміну даними, серед яких особливо поширеними є BACnet, Modbus TCP, KNX, OPC UA, які забезпечують сумісність між різними пристроями й платформами. Надійність такої взаємодії ґрунтується на використанні протоколів безпеки — TLS/SSL-шифрування, двофакторна автентифікація, контроль доступу на основі ролей, постійний аудит транзакцій і журналювання подій.

Важливим елементом є також синхронізація версій конфігурацій і цифрових двійників будівель: при кожному оновленні проєктної або технічної документації ці зміни мають відображатися у відповідних модулях аналітики, щоб уникнути розбіжностей між віртуальними параметрами й фізичним станом об'єкта. Це досягається шляхом впровадження BIM-інтеграції з платформами типу Revit, Navisworks, які передають актуальні дані в реальному часі до інформаційної моделі об'єкта [9].

Оцінка ефективності цифрових інструментів, які впроваджуються у межах енергоадаптивного будівництва, має стратегічне значення для визначення доцільності інвестицій, підтвердження досягнення цільових показників та забезпечення обґрунтованості управлінських рішень. У сучасній практиці застосовується підхід, який ґрунтується на комплексному аналізі технічної, економічної, екологічної та операційної результативності цифрових рішень. Це дозволяє виявити не лише безпосередній ефект (зменшення енергоспоживання), а й опосередковані впливи: підвищення тривалості експлуатації інженерних систем, скорочення частоти аварій, зменшення витрат на технічне обслуговування тощо.

Одним із базових підходів до такого аналізу є розробка системи формалізованих KPI, які дають змогу кількісно відстежувати ефективність функціонування цифрових платформ, модулів моніторингу, аналітичних панелей, виконавчих систем у реальному часі та в динаміці. Ці показники умовно поділяються на чотири групи: енергетичні, економічні, технічні та екологічні [10].

Енергетичні KPI дозволяють оцінити зміну питомого споживання ресурсів до і після впровадження цифрових рішень. До них належать показники середньодобового енергоспоживання, енергетичної щільності на 1 м², коефіцієнта ефективності систем HVAC. Водночас економічні KPI зосереджуються на таких аспектах, як економія витрат на обслуговування, зниження втрат при передачі ресурсів, скорочення витрат на аварійне усунення пошкоджень, а також рентабельність цифрових інвестицій.

Технічні KPI охоплюють тривалість безперебійної роботи обладнання, кількість несправностей на одиницю часу, час реакції системи на відхилення, тривалість відновлення нормального режиму. Вони мають ключове значення при оцінці довгострокової надійності цифрової інфраструктури. Нарешті, екологічні KPI – це показники зниження вуглецевого сліду, зменшення викидів CO₂, рівня використання невідновлюваних джерел енергії, відповідності критеріям екологічної сертифікації (наприклад, BREEAM, LEED) [12].

Нижче представлено таблицю 2 з прикладами ключових KPI, які застосовуються для оцінювання ефективності цифрових інструментів у контексті енергоадаптивного управління будівельними об'єктами.

Застосування зазначених KPI дозволяє будівельним компаніям, девелоперам і операторам інфраструктури проводити системний аудит цифрових ініціатив, визначати реальні ефекти, виявляти зони неефективності та формувати довгострокову стратегію управління життєвим циклом енергоадаптивного об'єкта. Інтеграція таких показників у цифрові дашборди забезпечує прозорість, підзвітність і можливість оперативного реагування [11].

Окрему увагу було приділено аналізу інструментів експлуатаційного супроводу – від SCADA і BMS-систем до BI-панелей і прогностичних моделей, що дозволяють приймати адаптивні та обґрунтовані рішення у режимі реального часу. Показано, як інтеграція BI-середовищ (Power BI, Tableau), KPI-метрик і сенсорних даних створює основу для гнучкого управління модернізацією, термореновацією та оптимізацією енергоспоживання. Також було сформовано архітектурну модель цифрової взаємодії, у якій узгоджено протоколи обміну, стандарти безпеки й аналітичну візуалізацію процесів.

Таблиця 2

Ключові KPI для оцінювання ефективності цифрових інструментів в енергоадаптивному будівництві *(розроблено автором на основі [10])*

<i>Категорія KPI</i>	<i>Показник</i>	<i>Мета оцінювання</i>
<i>Енергетичні</i>	Середнє енергоспоживання на м ²	Визначення ефективності енергоспоживання
	Коефіцієнт використання систем вентиляції (COP)	Порівняння енерговіддачі до витрат
<i>Економічні</i>	Економія експлуатаційних витрат	Підтвердження скорочення витрат
	ROI цифрового рішення	Обґрунтування окупності цифрових систем
<i>Технічні</i>	Середній час безвідмовної роботи обладнання (MTBF)	Визначення технічної надійності систем
	Середній час відновлення після збою (MTTR)	Швидкість реагування на критичні відхилення
<i>Екологічні</i>	Скорочення викидів CO ₂	Аналіз екологічного ефекту від цифрового управління
	Рівень використання ВДЕ у структурі споживання	Підвищення екологічної відповідальності об'єкта

Завершальним етапом стало формування формалізованої системи оцінювання ефективності цифрових рішень – через показники економії енергоресурсів, зниження вуглецевого сліду, тривалості безвідмовної експлуатації та окупності цифрових інвестицій. Це забезпечує методологічну базу для системного контролю, прогнозування та розвитку енергоадаптивного будівельного середовища відповідно до принципів сталості, технологічної чутливості та енергетичної ефективності.

Висновок.

Розглянуто сучасні цифрові інструменти, що допомагають керувати життєвим циклом енергоефективних будівель. Описано, як поєднання сенсорних систем, хмарних сервісів, аналітичних платформ і цифрових двійників створює єдину систему управління, яка дозволяє будівлям самостійно реагувати на зміни

середовища. Такі рішення забезпечують безперервний обмін інформацією між усіма етапами – від проєктування до експлуатації, що дозволяє своєчасно виявляти відхилення, планувати технічне обслуговування та прогнозувати споживання енергії.

Запропоновано модель, що об'єднує три основні процеси – моніторинг, моделювання та цифровий супровід. Моніторинг дає змогу в режимі реального часу відстежувати стан технічних систем, фіксувати показники мікроклімату, рівень споживання енергії, температуру, вологість і роботу обладнання. Моделювання забезпечує можливість аналізувати отримані дані, будувати прогнози, оцінювати ефективність рішень і розробляти сценарії енергоспоживання з урахуванням зовнішніх факторів. Цифровий супровід, у свою чергу, забезпечує постійний зв'язок між реальним об'єктом і його віртуальною копією – цифровим двійником, який дозволяє проводити аналіз «що-якщо» (what-if analysis) та приймати рішення на основі точних симуляцій.

Окремо наголошено на користі аналітичних програм Power BI, Tableau та Qlik, що дозволяють об'єднувати дані з різних джерел, будувати інтерактивні панелі управління та створювати зрозумілі візуальні моделі для керівників і технічного персоналу. На основі цих інструментів розроблено систему ключових показників ефективності (KPI), яка охоплює енергетичні, технічні, економічні та екологічні аспекти функціонування будівлі.

Використання цифрових технологій дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління, коли система не лише реагує на події, а й передбачає їх. Це дає змогу знизити витрати на енергію, продовжити термін служби обладнання, підвищити комфорт користувачів і забезпечити стабільну роботу будівель. Такий підхід сприяє формуванню нової філософії управління в будівництві, орієнтованої на сталій розвиток, енергозбереження й ефективну взаємодію між людиною, технологією та середовищем. Цифрові інструменти стають не просто засобом автоматизації, а основою інтелектуального управління будівлями у цифрову епоху.

Розглянуто сучасні цифрові інструменти, що допомагають керувати життєвим циклом енергоефективних будівель. Описано, як поєднання сенсорних систем, хмарних сервісів, аналітичних платформ і цифрових двійників створює єдину систему управління, яка дозволяє будівлям самостійно реагувати на зміни середовища. Такі технології забезпечують постійний обмін даними між усіма етапами життєвого циклу – від проєктування до експлуатації, даючи змогу оперативно реагувати на відхилення, оптимізувати витрати енергії й підвищувати ефективність управління.

Запропоновано модель, що поєднує три ключові процеси – моніторинг, моделювання та цифровий супровід. Моніторинг дозволяє у реальному часі відстежувати стан інженерних систем, рівень енергоспоживання, мікроклімат та інші параметри. Моделювання допомагає аналізувати отримані дані, прогнозувати поведінку будівлі та оцінювати наслідки управлінських рішень. Цифровий супровід забезпечує постійний зв'язок між фізичним об'єктом і його віртуальним аналогом – цифровим двійником, який інтегрує інформацію з різних джерел і підтримує прийняття рішень на основі аналітики та штучного інтелекту.

Підкреслено важливість застосування сучасних аналітичних платформ – Power BI, Tableau, Qlik, що дозволяють об'єднувати великі масиви даних, створювати інтерактивні звіти й панелі моніторингу для управлінців і технічних фахівців. На основі цих інструментів побудовано систему ключових показників ефективності

(КРІ), яка охоплює енергетичні, технічні, економічні та екологічні критерії оцінювання.

Перехід до проактивного управління дозволяє не лише реагувати на зміни, а й прогнозувати їх, забезпечуючи попереджувальний характер управлінських дій. Це сприяє зниженню експлуатаційних витрат, продовженню терміну служби обладнання, підвищенню комфорту користувачів і стійкості будівель. Таким чином, цифрові технології стають основою нової моделі управління у будівельній сфері – інтелектуальної, гнучкої та орієнтованої на сталий розвиток і ефективне використання енергетичних ресурсів.

Список літератури:

1. Qolomany, B., Al-Fuqaha, A., Gupta, A., Benhaddou, D., Alwajidi, S., Qadir, J., & Fong, A.C. (2019). Leveraging Machine Learning and Big Data for Smart Buildings: A Comprehensive Survey. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.01460>.
2. Fratean, A., Dobra, P. Key performance indicators for the evaluation of building indoor air temperature control in a context of demand side management: An extensive analysis for Romania. *Sustainable Cities and Society*. 2021. 68. 102805. DOI:10.1016/j.scs.2021.102805.
3. Dogan, G. Data analytics of building automation systems: a case study. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. 2018. 2. 123-137. DOI:10.18201/ijisae.2018642071.
4. Ritter T., Clarke S. (2023). Optimizing Building Management with a Lifecycle Approach. URL: <https://knowledgelibrary.ifma.org/optimizing-building-management-with-a-lifecycle-approach/>
5. Fuller, A., Fan, Zh., Day, Ch., Barlow, Ch. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2998358.
6. Digital Twins Part 2: Enabling Technologies and Challenges. URL: <https://orf.od.nih.gov/TechnicalResources/Documents/Technical%20Bulletins/21TB/Digital%20Twins%20Part%202%20%20Enabling%20Technologies%20and%20Challenge%20December%202021%20Technical%20Bulletin%20508.pdf>
7. Key enabling technologies for Europe's technological sovereignty. DOI: 10.2861/24482. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/697184/EPRS_STU\(2021\)697184_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/697184/EPRS_STU(2021)697184_EN.pdf)
8. Deru M., Benne K., Frank S. et al. (2020). Innovations in Sensors and Controls for Building Energy Management. Research and Development Opportunities Report for Emerging Technologies. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75601.pdf>
9. Lifecycle Twin. Create, maintain and visualize digital twins for buildings and infrastructure based on Building Information Modeling (BIM). URL: <https://xcelerator.siemens.com/global/en/products/buildings/building-x/solutions/applications/lifecycle-twin.html>
10. Chernyshev D., Ryzhakova, G., Honcharenko T., Chupryna I., Reznik N. (2023). Digital administration of the project based on the concept of smart construction. In V. Kreinovich, S. Thach, N. Nguyen, & V. Reddy (Eds.) *Lecture Notes in Networks and Systems* (Vol. 495, pp. 1316–1331).
11. Інструменти енергоефективності в промисловості та АПК: кращі рішення: посібник. URL: https://ukraine-oss.com/wp-content/uploads/2024/09/draft-posibnyka_energoefektyvnist_web-1.pdf

12.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*. 12. 40-50. DOI:10.46338/ijetae0122_05.

13.McGehee J. Not Just Smart but Strategic: Why Predictive Maintenance Benefits Smart Buildings. URL: <https://www.verytechnology.com/insights/not-just-smart-but-strategic-why-predictive-maintenance-benefits-smart-buildings>

14.Програма XXXII міжнародної науково-практичної конференції: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD-2024). Харків, 22-25 травня. URL: <https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/01/Programka-2024.pdf>

Denis SOBOL

Digital tools for monitoring, modeling, and supporting the life cycle of energy-adapted building solutions

This paper examines modern digital tools that facilitate the management of the life cycle of energy-efficient buildings. It describes how the integration of sensor systems, cloud services, analytical platforms, and digital twins creates a unified management system that enables buildings to autonomously respond to environmental changes. Such solutions ensure continuous information exchange across all stages – from design to operation – allowing for timely detection of deviations, planning of maintenance activities, and forecasting of energy consumption.

A model is proposed that integrates three core processes – monitoring, modeling, and digital support. Monitoring enables real-time tracking of technical systems, recording of indoor climate indicators, energy consumption levels, temperature, humidity, and equipment performance. Modeling allows the analysis of collected data, the development of forecasts, evaluation of energy efficiency solutions, and the creation of energy consumption scenarios that account for external factors. Digital support, in turn, ensures a continuous connection between the physical building and its virtual counterpart – the digital twin, which provides opportunities for what-if analysis and data-driven decision-making based on accurate simulations.

Particular emphasis is placed on the advantages of analytical software such as Power BI, Tableau, and Qlik, which enable data integration from multiple sources, the creation of interactive control dashboards, and the visualization of complex processes in a clear and accessible format for both managers and technical specialists. Based on these tools, a Key Performance Indicator (KPI) system has been developed, encompassing energy, technical, economic, and environmental dimensions of building performance.

The use of digital technologies makes it possible to transition from reactive to proactive management, where the system not only responds to events but also anticipates them. This approach helps reduce energy costs, extend equipment life cycles, enhance user comfort, and ensure the stable operation of buildings. Furthermore, it contributes to shaping a new philosophy of construction management focused on sustainability, energy conservation, and effective interaction between humans, technology, and the environment. Digital tools thus become not merely instruments of automation but the foundation of intelligent building management in the digital age.

Keywords: *energy-adaptive buildings, digital monitoring, life cycle, digital twin, BIM, SCADA, energy efficiency, Business Intelligence.*