

Федорченко Микола Андрійович

Аспірант кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики,

<https://orcid.org/0009-0009-0156-6042>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Катін Олександр Андрійович

Аспірант кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики,

<https://orcid.org/0009-0003-9356-4197>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

ПОБУДОВА ІНТЕГРОВАНОГО АНАЛІТИЧНОГО ПРОСТОРУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ СУКУПНОГО РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЛІ

Анотація. Тема побудови інтегрованого аналітичного простору для виявлення сукупного рівня енергоефективності будівлі є надзвичайно актуальною в умовах підвищених вимог до енергозбереження в будівельній сфері. Зростання цін на енергоносії, екологічні виклики та нормативно-правові ініціативи стимулюють необхідність створення систем, які здатні точно аналізувати енергетичну ефективність об'єктів на всіх етапах їх життєвого циклу. Сучасні інформаційні технології дозволяють інтегрувати в єдине середовище величезні масиви даних – від конструктивних особливостей до поведінкових моделей споживання енергії. Розробка такого простору передбачає поєднання архітектурно-проектної інформації з параметрами енергоспоживання, експлуатаційними даними, кліматичними умовами, сценаріями навантажень, а також інформацією про енергоефективні заходи. Використання інструментів аналізу великих даних (Big Data), машинного навчання, IoT, цифрових сенсорів та платформ типу Building Management Systems (BMS) забезпечує глибоку діджиталізацію процесу оцінювання. Ключовим у побудові такого аналітичного середовища є концепція цифрового двійника будівлі, що дозволяє в режимі реального часу моделювати енергетичні процеси, відслідковувати відхилення від нормативних показників та адаптувати стратегії енергоуправління. Інтеграція систем енергетичного моніторингу з архітектурною BIM-моделлю забезпечує створення повноцінної цифрової платформи управління ефективністю. Впровадження інтегрованого аналітичного простору дозволяє архітекторам, інженерам, девелоперам та експлуатуючим організаціям приймати обґрунтовані рішення щодо вибору матеріалів, технологій та систем. Це сприяє не лише зниженню енергоспоживання та витрат, а й скороченню викидів парникових газів, підтримуючи цілі сталого розвитку та екологічного будівництва. Метою побудови такого простору є розробка інтелектуальної системи, що автоматично обробляє та аналізує всі аспекти енергоспоживання, забезпечуючи досягнення оптимальних показників енергоефективності на всіх стадіях – від концепції до експлуатації.

Ключові слова: енергоефективність; інтегрований аналітичний простір; енергетичне моделювання; великі дані; штучний інтелект; енергоспоживання; будівельні технології; оптимізація енергії

Постановка проблеми

Сучасний будівельний сектор стикається з необхідністю вдосконалення методів аналізу енергетичних показників споруд, що дозволить підвищити ефективність енергоспоживання, знизити витрати на експлуатацію та зменшити вплив на довкілля. Це дослідження зосереджується на виявленні недоліків існуючих підходів до оцінки енергоефективності та вивченні можливостей застосування сучасних технологій, таких як великі дані та штучний інтелект, для їх покращення.

Основною метою є розробка інтегрованого аналітичного простору, який дозволить зібрати, аналізувати та обробляти дані щодо різних енергетичних параметрів будівлі, зокрема теплові втрати, використання відновлюваних джерел енергії, природне освітлення та кліматичні фактори. Застосування штучного інтелекту в цій системі дозволить автоматизувати процес аналізу та прогнозування енергоефективності будівлі, що підвищить точність оцінок та скоротить час на обробку великих масивів даних. Використання таких технологій забезпечить моделювання енергетичних

процесів у будівлі на різних етапах її життєвого циклу, дозволяючи прогнозувати енергоспоживання та розробляти оптимальні стратегії для його зниження.

Особлива увага приділяється розробці методології для комплексної оцінки енергоефективності шляхом врахування всіх пов'язаних показників: від теплового комфорту до використання альтернативних джерел енергії. Планується тестування запропонованого аналітичного простору на практичних прикладах, що дозволить виявити його ефективність та можливість застосування в реальних будівельних проектах. Це дослідження має значний потенціал для покращення енергетичних характеристик споруд, підвищення екологічної стійкості будівельних проектів та сприяння економічним вигодам як для забудовників, так і для кінцевих користувачів.

Мета статті

У центрі наукового аналізу – обґрунтування концептуальних підходів та інструментально-методологічного підґрунтя для побудови інтегрованого аналітичного простору, який забезпечує виявлення сукупного рівня енергоефективності будівель. Розкриваються можливості застосування цифрових технологій, зокрема штучного інтелекту, аналітики великих даних, цифрових двійників та енергетичного моделювання, як складових комплексного середовища, що дозволяє здійснювати багатовимірну оцінку енергоспоживання об'єктів нерухомості.

Ключовим аспектом дослідження є інтеграція джерел даних різної природи – BIM-моделей, IoT-сенсорів, кліматичних характеристик і фактичних експлуатаційних параметрів – для створення єдиної цифрової платформи моніторингу та управління. Такий підхід підвищує точність оцінок і забезпечує прийняття більш обґрунтованих рішень на етапах проектування, реалізації та експлуатації будівель.

Розроблена концепція сприяє зниженню втрат енергії, ефективнішому використанню ресурсів і досягненню екологічної сталості. Окрему увагу приділено виявленню викликів, що виникають у процесі впровадження інтегрованих аналітичних систем в умовах цифрової трансформації будівельної галузі та змін у системах інженерного управління.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Аналіз сучасних наукових підходів до оцінки енергоефективності будівель свідчить про зростання інтересу до створення інтегрованих систем енергетичного моніторингу. У працях В. С. Єрьоміна та П. В. Ніколаєнка розглянуто структурно-енергетичні

моделі об'єктів, що поєднують технічні параметри будівель з даними про навколишнє середовище. Автори наголошують на доцільності використання мультикомпонентного аналізу для визначення рівня енергоефективності. Водночас у дослідженнях І. В. Сидоренка акцент зроблено на використанні BIM-технологій у контексті енергоінформаційного проектування, що дає змогу включати параметри теплопередачі, матеріалів та систем вентиляції в процес прогнозування енергетичних характеристик.

Значний внесок зробили й зарубіжні автори. Зокрема, у роботах J. Clarke та A. Marszal підкреслюється роль динамічного моделювання енергоспоживання в реальному часі та важливість створення цифрових двійників для управління будівлями з нульовим споживанням енергії. Статті, опубліковані в журналах *Energy and Buildings* та *Building Simulation*, зосереджуються на практичному впровадженні систем енергетичного моніторингу з використанням IoT-сенсорів та аналітики штучного інтелекту.

Виклад основного матеріалу

Побудова інтегрованого аналітичного простору для вияву сукупного рівня енергоефективності будівлі є важливим аспектом сучасного будівництва, оскільки енергоефективність безпосередньо впливає на витрати на експлуатацію, екологічні показники та комфортність перебування в приміщеннях. Для досягнення високих результатів в енергоефективності важливо впровадження новітніх технологій та інструментів, що дозволяють проводити комплексний аналіз різних факторів, які впливають на енергоспоживання.

Важливим етапом є створення інтегрованого аналітичного простору, який включає в себе системи збору, обробки та аналізу даних. Однією з ключових складових цього процесу є використання сучасних інформаційних технологій, зокрема, систем інформаційного моделювання будівель (BIM) та спеціалізованих програм для енергетичного моделювання. Завдяки цим інструментам можливе створення віртуальних моделей будівель, що дозволяють візуалізувати їх енергоспоживання та ідентифікувати потенційні можливості для підвищення ефективності. Системи моніторингу та контролю в реальному часі також грають важливу роль у процесі аналізу енергоефективності. Вони забезпечують безперервний збір даних про енергоспоживання, що дозволяє вчасно реагувати на зміни та вносити корективи в експлуатацію будівлі [1].

У рамках інтегрованого аналітичного простору важливо враховувати різні етапи життєвого циклу будівлі, від проектування до експлуатації та реконструкції. Це дозволяє не лише оптимізувати енергоспоживання, а й забезпечити сталий розвиток

архітектурних рішень, спрямованих на зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Сьогодні, безумовно, існує потреба порівняти різні підходи до розробки програмного забезпечення. Якщо розглядати програмне забезпечення як актив, то повторне використання компонентів може значно скоротити витрати і час на розробку, зокрема в галузі енергоефективності. Коли йдеться про створення аналітичного простору, важливо, щоб програмні компоненти не лише були взаємопов'язані, але й могли адаптуватися до змінних вимог проекту [2].

На рис. 1 показано зведену схему структури Особливого Теплого Пункту Бази Енергетики. Також варто зазначити підхід, який суттєво підвищує ефективність процесу створення розширюваного та налаштованого компонентного програмного забезпечення. Це програмне забезпечення, розроблене за допомогою даного підходу, дозволяє створити багатокомпонентну програмну систему, здатну автоматизувати проектування енергоефективних будівель [3].

Ефективність вирішення завдання проектування енергетичних будівель за допомогою компонентного програмного забезпечення безпосередньо залежить від набору доступних методів, які реалізовані у вигляді компонентів. У рамках цієї системи розробники можуть використовувати різноманітні модулі, які адаптовані під специфічні вимоги проекту, що дозволяє швидше проводити аналітичні розрахунки. Це також сприяє ефективному моніторингу показників енергоефективності та коригуванню проектів відповідно до реальних умов експлуатації [4].

З метою побудови інтегрованого аналітичного простору для виявлення сукупного рівня енергоефективності будівлі важливо, щоб система могла легко інтегрувати різні інструменти аналізу та моделювання. Це включає в себе як програмні

рішення, так і апаратні засоби, що дозволяє здійснювати комплексний підрахунок енергетичних витрат, враховуючи різноманітні фактори, які впливають на енергоефективність [5]. Впровадження даних технологій також забезпечить можливість симуляцій, які дозволять тестувати різні сценарії проектування та їх вплив на енерговитрати.

Для кількісної оцінки енергоефективності можна використовувати наступні формули:

1. Загальна енергоефективність будівлі (EE) може бути розрахована за формулою:

$$EE = \frac{E_g}{E_n}, \quad (1)$$

де E_g – це фактичне енергоспоживання; E_n – планове енергоспоживання.

2. Коефіцієнт енергетичної продуктивності (KEP) визначається як:

$$KEP = \frac{P_g}{E_n}, \quad (2)$$

де P_g – це вироблена енергія (наприклад, від відновлювальних джерел); E_n – спожита енергія.

3. Коефіцієнт енергетичної економії (KEE) можна обчислити за формулою:

$$KEE = (E_n - \frac{E_\phi}{E_n}) \times 100\%, \quad (3)$$

де E_ϕ – фактичне споживання енергії після впровадження енергозберігаючих заходів.

4. Витрати на енергію на одиницю площі (EPU) розраховуються так:

$$EPU = \frac{E_g}{A}, \quad (4)$$

де A – загальна площа будівлі; E_m – загальні енергетичні витрати.

5. Витрати на енергію на одиницю продукції (EPP) визначаються за формулою:

$$EPP = \frac{E_g^2}{Q}, \quad (5)$$

де Q – це обсяг виробленої продукції.



Рисунок 1 – Структура особливого теплового пункту бази енергетики (ОТП БЕ)

Розроблено автором на основі [2].

Завдяки модульній архітектурі компонентного програмного забезпечення розробники можуть впроваджувати нові алгоритми та аналітичні методи без значних витрат часу та ресурсів. Це дозволяє зменшити ризики помилок при проектуванні, адже готові компоненти проходять попереднє тестування та верифікацію. Використання компонентів, які вже були апробовані в інших проектах, забезпечує впевненість у їхній ефективності та надійності [6].

Аналіз енергетичних характеристик, проведений за допомогою інтегрованого аналітичного простору, відкриває нові можливості для покращення проектних рішень. Наприклад, використання даних про споживання енергії у різні пори року або в залежності від режиму роботи будівлі дозволяє оптимізувати енергетичні системи та зменшити експлуатаційні витрати. Завдяки цьому забудовники отримують можливість розробляти проекти, що не лише відповідають сучасним вимогам щодо енергоефективності, а й є економічно вигідними. Важливим аспектом цього підходу є також залучення сучасних технологій, таких як штучний інтелект і машинне навчання, які можуть аналізувати великі обсяги даних і пропонувати оптимальні рішення. Це дозволить створити адаптивні системи, які самостійно навчаються на основі зібраної інформації, покращуючи процес проектування та експлуатації будівель.

Вимірювання цілісної енергоефективності є важливим аспектом сучасного будівництва та управління енергетичними системами [7]. Ключовим з інструментів вимірювання енергоефективності є енергетичні аудити, які включають огляд, аналіз та оцінку енергетичних витрат у будівлі.

Аудит дозволяє виявити неефективні системи, що споживають надмірну кількість енергії, і рекомендувати заходи щодо їх модернізації. Аудит може включати вимірювання параметрів, таких як споживання електроенергії, теплоенергії, води, а також оцінку термічних характеристик будівлі.

Додатково використовуються інструменти, такі як системи моніторингу енергії (EMS), які дозволяють в реальному часі контролювати енергоспоживання та аналізувати дані для подальшої оптимізації. Системи EMS часто включають сенсори, які збирають дані про використання енергії, температури, вологості та інших параметрів, що впливають на енергоефективність. Методи вимірювання цілісної енергоефективності також можуть включати комп'ютерне моделювання, яке дозволяє проводити симуляції енергетичних систем у різних сценаріях експлуатації [8]. Для комплексної оцінки енергоефективності важливо враховувати не лише технічні параметри, а й соціально-економічні фактори. Підходи до вимірювання можуть включати аналіз витрат і вигод, екологічний вплив, а також комфорт користувачів. Рис. 2 ілюструє основні інструменти та методи, що використовуються для вимірювання цілісної енергоефективності, демонструючи їх взаємозв'язок та роль у загальному процесі оцінки енергетичних систем.

Побудова інтегрованого аналітичного простору є критично важливим етапом для досягнення високого рівня енергоефективності в будівництві. Така система дозволяє комплексно оцінювати енергетичні характеристики будівлі, враховуючи різноманітні аспекти, такі як матеріали, технології, системи опалення та вентиляції, а також поведінку користувачів [9].

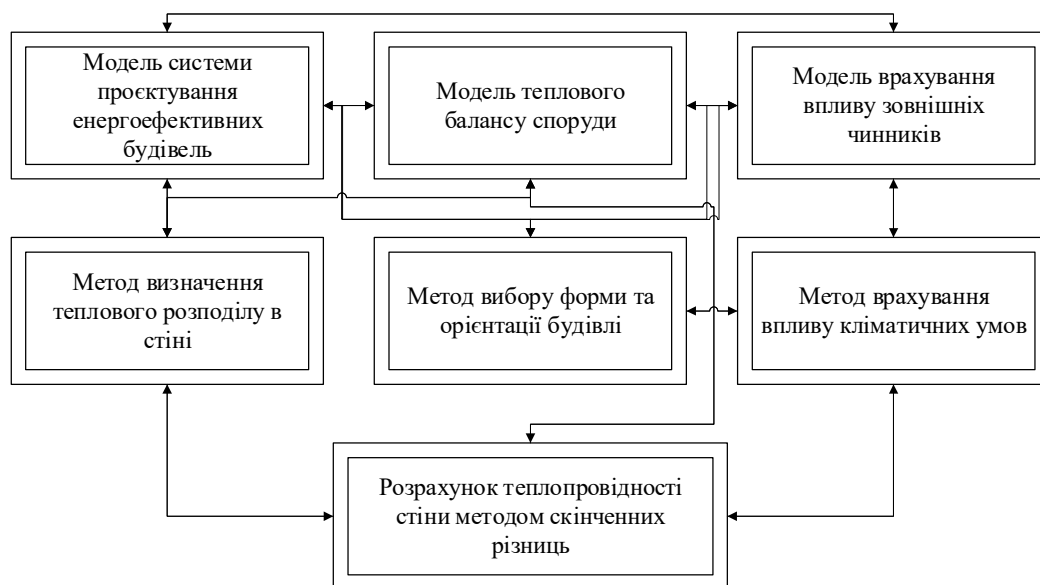


Рисунок 2 – Вимірювання цілісної енергоефективності, інструментарій та методика

Розроблено автором на основі [8].

Однією з ключових складових інтегрованого аналітичного простору є можливість об'єднання різних інструментів для аналізу та моделювання енергії. Це передбачає використання як програмних рішень, так і апаратних засобів, які можуть взаємодіяти та обмінюватися даними в реальному часі. Ці компоненти для розрахунку енергетичних витрат наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Компоненти розрахунку енергетичних витрат відповідно до чинників, які впливають на енергоефективність

Компонент	Опис
Бази даних	Зберігають інформацію про енергоспоживання, характеристики матеріалів та технології.
Аналітичні інструменти	Модулі для виконання розрахунків та аналізу, що використовують статистичне моделювання.
Системи візуалізації	Допомагають представити результати аналізу в зрозумілому вигляді.
Системи моніторингу	Датчики і прилади, які здійснюють постійний контроль енергетичних витрат.
Технології штучного інтелекту	Аналізують дані, виявляють патерни споживання енергії та пропонують оптимальні рішення.
Симуляційні модулі	Дозволяють тестувати різні сценарії проектування та їх вплив на енергетичні витрати.

Розроблено автором на основі [9].

Основні компоненти інтегрованого аналітичного простору включають бази даних, які зберігають інформацію про енергоспоживання, характеристики матеріалів, технології, системи керування, а також дані про експлуатацію будівлі. Аналітичні інструменти, що включають модулі для виконання розрахунків та аналізу, забезпечують глибокий аналіз даних, використовуючи методи статистичного моделювання та штучного інтелекту [10]. Крім того, системи моніторингу, які включають реальні датчики і прилади, дозволяють здійснювати постійний контроль енергетичних витрат у будівлі, що забезпечує оперативне реагування на зміни. Впровадження сучасних технологій, таких як штучний інтелект і машинне навчання, відкриває нові можливості для оптимізації енергоспоживання.

Інтегрований аналітичний простір для виявлення сукупного рівня енергоефективності будівлі не лише сприяє підвищенню ефективності проектування, але й забезпечує стабільність і надійність експлуатації енергетичних систем. Завдяки комплексному підходу до аналізу енергетичних характеристик проектувальники отримують можливість розробляти рішення, що відповідають сучасним вимогам до енергоефективності, сприяючи сталому розвитку та збереженню природних ресурсів [11].

Розроблена п'ятикомпонентна системна модель дозволяє реалізувати програмні компоненти інтегрованого аналітичного простору проекту енергетичних будівель, що схематично представлена на рис. 3.

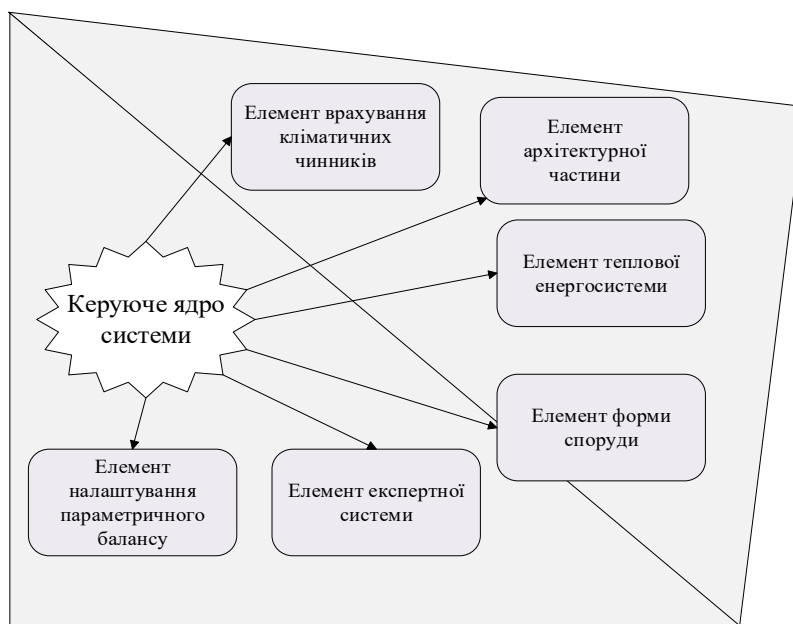


Рисунок 3 – Багатопотокова архітектура інтелектуального будинку

Розроблено автором на основі [11].

Ця модель є основою для створення ефективного аналітичного простору, що забезпечує комплексний підрахунок енерговитрат, інтегруючи різні методи аналізу та моделювання. Основні компоненти системи включають модулі для збору даних про енергоспоживання, аналітичні інструменти для виконання розрахунків, системи візуалізації результатів та технології моніторингу.

Адаптивний підхід передбачає гнучкість системи, що дозволяє налаштовувати модулі під специфічні вимоги проектів та змінювати алгоритми аналізу в залежності від умов експлуатації будівлі. Це не лише сприяє підвищенню ефективності проектування, а й дозволяє адаптувати рішення в реальному часі, враховуючи зміни в споживанні енергії [12].

Зокрема, інтегрована система здатна враховувати різні аспекти, такі як сезонні коливання в енергоспоживанні, ефективність систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, а також поведінку користувачів, що в сукупності підвищує точність оцінки енергоефективності. Для цього можна використовувати такі формули:

1. Загальна енергія, що споживається будівлею:

$$E_t = E_h + E_c + E_l + E_a, \quad (6)$$

де E_h , E_c , E_l , E_a – це енергія, спожита відповідно для опалення, охолодження, освітлення та електричних приладів.

2. Енергоефективність будівлі:

$$EE = \frac{E_u}{E_t}, \quad (7)$$

де E – це корисна енергія, яка використовується для забезпечення комфорту в будівлі.

3. Рівень енергетичних витрат дає можливість оцінити витрати енергії на квадратний метр.

$$Ce = \frac{E_t}{A}, \quad (8)$$

де A – це площа будівлі.

4. Коефіцієнт енергетичної ефективності:

$$KEE = \frac{E_{min}}{E_a}, \quad (9)$$

де E_{min} – це мінімально необхідна енергія для комфортного існування; E_a – фактичні енергетичні витрати.

Запропонована модель не лише сприяє більш ефективному управлінню енергетичними ресурсами, але й відкриває нові можливості для оптимізації проектних рішень, враховуючи технологічні, економічні та екологічні аспекти. Це дозволяє розробляти проекти, що відповідають сучасним вимогам щодо енергоефективності, підвищуючи загальний рівень стійкості будівель у процесі їх експлуатації [13].

Модульна архітектура IoT-платформи для управління енергоспоживанням в розумному будинку забезпечує інтеграцію різних пристроїв і систем, що дозволяє ефективно моніторити і оптимізувати використання енергії. Основною

метою таких платформ є зниження витрат на енергоспоживання, підвищення енергоефективності та покращення комфорту проживання [14]. У табл. 2 представлено основні складові компоненти модульної архітектури IoT-платформи.

Таблиця 2 – Основні компоненти модульної архітектури IoT-платформи

Компонент	Опис	Приклади використання
Датчики	Збирають дані про енергоспоживання та параметри середовища	Датчики освітленості, температури, вологості
Актuatorи	Керують системами енергоспоживання	Системи опалення, кондиціонування, освітлення
Централізований контролер	Обробляє дані і координує роботу актуаторів	Системи управління розумним домом
Інтерфейс користувача	Дозволяє користувачам взаємодіяти з платформою	Мобільні додатки, веб-портали
Хмарні сервіси	Зберігають та аналізують дані	Аналітика споживання, зберігання історії даних
Комунікаційні протоколи	Забезпечують передачу даних між пристроями	MQTT, Zigbee, Wi-Fi

Розроблено автором на основі [14].

Завдяки модульній архітектурі IoT-платформи можуть бути легко адаптовані під специфічні потреби користувачів, що забезпечує гнучкість у управлінні енергоспоживанням в розумних будинках. Такі системи здатні аналізувати споживання енергії в реальному часі та автоматично налаштовувати параметри роботи обладнання, що в результаті призводить до зниження витрат на енергоресурси і підвищення комфорту [15].

Інформаційна підтримка, спрямована на проектування енергетичних будівель, здійснюється за допомогою засобів моделювання інформаційних будівель. Для розробки інтегрованої інформаційно-технологічної платформи енергетичних будівель пропонується використовувати модульну архітектуру. Архітектуру інтегрованої інформаційно-технологічної платформи енергетичних будівель представлено на рис. 4.

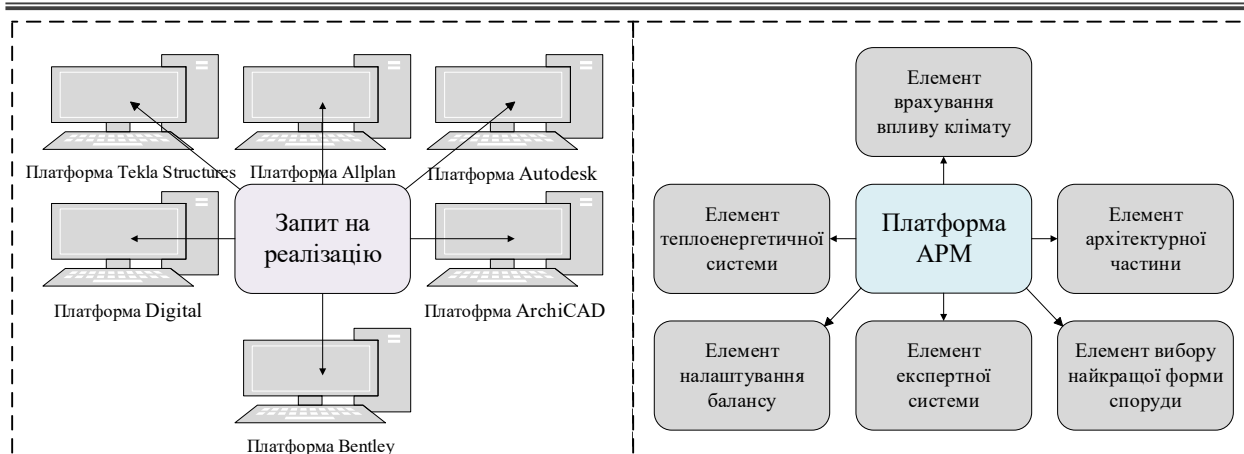


Рисунок 4 – Платформа архітектури інтегрованої інформаційно-технологічної системи енергетичних споруд

Розроблено автором на основі [15]

Реалізація програмно-інформаційного забезпечення виконується з використанням мови програмування C++ та системи управління базами даних, що гарантує надійність роботи системи. Компоненти архітектурної складової ефективно відображають структуру та процес проектування завдяки інформаційній моделі будівлі, створеній у засобах моделювання інформаційних будівель [16].

Компонент, відповідальний за облік впливу клімату, надає дані про вплив зовнішнього середовища на оболонку будівлі. На основі цих даних компонент вибору оптимальної форми будівлі формує і визначає оптимальні параметри її форми. Оптимізація форми будівлі може бути виражена через формулу:

$$F = \frac{As}{Ab}, \quad (10)$$

де F – коефіцієнт оптимізації; As – площа зовнішньої поверхні будівлі; Ab – загальна площа будівлі.

Компонент, що відповідає за встановлення балансу параметрів моделей, встановлює зв'язки і залежності між цими параметрами. Оцінка

енергоефективності проектного рішення інженера здійснюється за допомогою компонента тепло-енергетичної складової, що аналізує теплові характеристики будівлі та її систем. Це дозволяє не лише оцінити енергетичні витрати, а й забезпечити інтеграцію з іншими компонентами, що враховують соціальні, економічні та екологічні аспекти проекту [17].

Компоненти експертної системи, представлені в табл. 3, характеризуються нечіткими індивідуальними характеристиками проектувальника, такими як знання, навички та вміння. Ці характеристики включають знання про розв'язання проектних завдань, зокрема, пов'язаних з визначенням енергоефективності проектних рішень. Вхідними даними цієї системи є індекс енергоефективності проекту та дані про місця тепловтрат, тоді як вихідними результатами є класи енергоефективності будівлі та експертні рекомендації щодо зменшення тепловтрат у проблемних зонах огорожувальних конструкцій. Табл. 3 демонструє основні компоненти, які включає в себе експертна система.

Таблиця 3 – Складові компоненти експертної системи

Компоненти експертної системи	Опис
Нечіткі індивідуальні характеристики проектувальника	Знання, навички, вміння, які включають знання про розв'язання проектних завдань, зокрема визначення енергоефективності проектних рішень.
Вхідні дані	Індекс енергоефективності проекту та дані про місця тепловтрат.
Вихідні результати	Класи енергоефективності будівлі та експертні рекомендації щодо зменшення тепловтрат.
Оцінка системних знань	Інтегрована оцінка, що відображає компетентність проекту.
Динамічне внесення інформації	Експерти можуть додавати нову інформацію до LMS через інтерфейси компонентів.
Моделі будівель	Розроблені за методологією інформаційного моделювання будівель для автоматизації проектування та підготовки проектів.
Розробка підсистем	Компанія має можливість розробити нові підсистеми та інтегрувати їх у загальний програмний комплекс.

Стандартизований інтерфейс бази даних	Доступ до даних, таких як параметричні моделі, та можливість їх змінювати.
Механізми управління додатками	Створення, відкриття, пошук, видалення документів, збереження, експорт, друк, запис і зчитування параметрів.
Open API	Забезпечує повний доступ до управління додатками, маніпулювання структурними елементами інформаційної моделі.
Геометрична підсистема	Проектно-технічне моделювання будівлі, перевірка конструкційних елементів за класифікаційними кодами, встановлення функціональних зв'язків між елементами.

Розроблено автором на основі [17].

Для забезпечення інтеграції з зовнішніми додатками інформаційно-технологічна платформа надає кілька важливих інструментів для взаємодії. По-перше, існує стандартизований інтерфейс доступу до бази даних, який дозволяє зовнішнім додаткам отримувати доступ до даних, таких як параметричні моделі, та змінювати їх вміст. По-друге, реалізовані механізми для загального управління додатками, що включають створення, відкриття, пошук і видалення документів, а також їх збереження, експорт, друк, запис і зчитування параметрів [18].

У рамках модуля "Геометрична підсистема" здійснюється проектно-технічне моделювання будівлі, під час якого проводиться перевірка конструкційних елементів за класифікаційними кодами для визначення їх функціонального призначення. Це, в свою чергу, дозволяє встановити функціональні зв'язки між робочими поверхнями будівлі. На цьому етапі створюється первинний граф з'єднань, який повинен бути доповнений основними і допоміжними конструктивними елементами. Між конструктивними елементами встановлюються з'єднання, а при необхідності можуть бути додані нові з'єднання для відсутніх розмірів, таких як допуски на взаємне розташування поверхонь.

1. Формула для обчислення індексу енергоефективності з урахуванням кількох факторів, включаючи обсяг споживаної енергії на різні енергетичні потреби та вплив кліматичних умов:

$$EEI = \frac{\sum_{i=1}^n EC_{(i)} + Ed_{(j)}}{\sum_{k=1}^m EN_{(k)} \times CF_k} \times \frac{1}{1 + \beta \times C_{clim}}, \quad (11)$$

де EEI – індекс енергоефективності; $EC_{(i)}$ – фактичне енергоспоживання для різних потреб; $Ed_{(j)}$ – додаткове споживання енергії, пов'язане з специфічними умовами j ; $EN_{(k)}$ – нормативне енергоспоживання для категорії k ; CF_k – коефіцієнт корекції для категорії k ; β – коефіцієнт впливу кліматичних умов, C_{clim} – індекс кліматичних умов.

2. Формула для обчислення теплових втрат через огорожувальні конструкції, яка враховує додаткові параметри, такі як конвективні і радіаційні тепловтрати, а також вплив вітру:

$$Q = \sum_{j=1}^n (U_j \times A_j \times \Delta T_j + (C_v \times A_j \times x(T_v - T_3) + C_r \times A_j \times (T_n - T_3))), \quad (12)$$

де Q – загальні теплові втрати; U_j – коефіцієнт теплопередачі для конструкції j ; A_j – площа конструкції j ; ΔT_j – різниця температур між внутрішнім і зовнішнім середовищем для конструкції j ; C_v – коефіцієнт конвекції; C_r – коефіцієнт радіації; T_v – температура внутрішнього середовища; T_3 – температура зовнішнього середовища; T_n – температура поверхні конструкції.

З використанням цих удосконалених формул система забезпечує точнішу оцінку енергоефективності та теплових втрат, що є важливими аспектами для інтегрованого аналітичного простору у сфері енергетичної ефективності будівель.

Процес побудови інтегрованого аналітичного простору для визначення рівня енергоефективності будівлі є складним та багатоступеневим, і включає використання сучасних інформаційних технологій та моделей. Одним із ключових підходів є інтеграція даних з різних джерел, таких як BIM-моделі (Building Information Modeling), системи управління енергією (EMS), датчики інтернету речей (IoT) та інші інструменти, що забезпечують безперервний моніторинг та аналіз енергоефективності будівлі [19].

Інтеграція аналітичного простору дає змогу забезпечити точний моніторинг енергетичних витрат на основі даних, які надходять від датчиків, розташованих по всій будівлі. Це дозволяє не лише оцінити поточний стан, а й прогнозувати майбутні енергетичні витрати, що є важливим для подальшого удосконалення будівлі та зменшення теплових втрат [20]. Важливо зазначити, що у такій системі значну роль відіграють експертні системи, які, використовуючи алгоритми штучного інтелекту, можуть оцінювати якість проектних рішень і надавати рекомендації щодо підвищення енергоефективності.

Висновок

Процес побудови інтегрованого аналітичного простору для виявлення сукупного рівня енергоефективності підкреслює важливість впровадження сучасних технологій у процес оцінки енергетичних характеристик споруд. Інтегрований аналітичний простір, що базується на використанні великих даних, штучного інтелекту та автоматизованих систем, дозволяє підвищити точність прогнозування енергоспоживання та розробки оптимальних рішень для підвищення енергоефективності будівель.

Цей підхід дозволяє комплексно враховувати всі важливі енергетичні параметри, такі як теплоізоляція, використання відновлюваних джерел

енергії, кліматичні умови та експлуатаційні характеристики будівлі. Інтеграція цих даних у єдиний аналітичний простір надає можливість проводити глибокий аналіз на різних етапах життєвого циклу будівлі, що сприяє прийняттю більш обґрунтованих рішень щодо енергетичної стратегії та зниженню експлуатаційних витрат.

Розроблений підхід сприятиме підвищенню екологічної стійкості та економічної вигоди будівельних проектів. Впровадження такого простору є важливим кроком до створення більш енергоефективних будівель, що відповідають сучасним вимогам до сталого розвитку, економічної ефективності та мінімізації негативного впливу на довкілля.

Список літератури

1. Пристинська І. В. Особливості атрибуції будівельних проектів в господарському портфелі девелоперської компанії: зміна парадигми та інноваційні рішення управління активами будівельної організації. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*: зб. наук. праць. 2017. Вип. 35. Ч. 3. С. 67–76.
2. Solow R. On Theories of Unemployment. *American Economic Review*. 1980. 230 p.
3. Бушуева Н. С. *Модели и методы проактивного управления программами организационного развития*. Київ: Наук. світ, 2007. 270 с.
4. Гаффарианхосейні А., Бернандес А., Матар П., Альвадор А. Оцінка енергетичної ефективності будівель: огляд методів, що базуються на аналізі даних. *Energy and Buildings*. 2017. Вип. 153. С. 86–103.
5. Аль-Аджджі Ф., Ханбі В. І. Моделювання енергоспоживання для житлових будинків у Кувейті. *Energy and Buildings*. 2008. Вип. 40, № 6. С. 1101–1109.
6. Roman A., Andrii S., Galya R., Iurii C., Hanna S. (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*. 2022. 12(1). P. 40–50.
7. Кроулі Д. Б., Лофтінг Л. К., Кноль В. Д., Педерсен Дж. В. EnergyPlus: створення програми нового покоління для моделювання енергетичної ефективності будівель. *Energy and Buildings*. 2001. Вип. 33, № 4. С. 319–331.
8. Гонсалес П. А., Замаррено Дж. М. Прогноз енергоспоживання будівель за допомогою зворотної штучної нейронної мережі. *Energy and Buildings*. 2005. Вип. 37, № 6. С. 595–601.
9. Chupryna G., Ryzhakova V., Pokolenko D., Prykhodko D., Faizullin A. Establishment of the rational economic and analytical basis for projects in different sectors for their integration into the targeted diversified program for sustainable energy development. 2021 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST). 2021. P. 1–9.
10. Хонг Т., Чен Х., Чаблінський Д. Комерційний енергозберігач будівель: Інструмент аналізу енергоефективності реконструкції. *Applied Energy*. 2015. Вип. 159. С. 298–309.
11. Веттер М. GenOpt® – Універсальна програма для оптимізації. *Energy and Buildings*. 2002. Вип. 34, № 9. С. 999–1005.
12. О'Доннелл Дж. Т., Деркач К. Т., Поллак Р. А. Роль BIM у зеленому проектуванні будівель. *Automation in Construction*. 2014. Вип. 40. С. 126–135.
13. Сангвінетті П., Шен В. Інформаційне моделювання будівель та стійкість: зелене проектування в Autodesk Revit. *Architectural Engineering and Design Management*. 2012. Вип. 8, № 1. С. 28–39.
14. Міністерство енергетики США. *EnergyPlus Engineering Reference: Довідник по розрахунках EnergyPlus*. 2016. 315 с.
15. Зуо Дж., Чжао З. І. Дослідження зелених будівель: поточний стан і майбутні перспективи. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Вип. 30. С. 271–281.
16. Shpakova H., Chupryna I., Ivakhnenko I., Zinchenko M., Plys N. Tools For Assessing The Competitiveness Of A Construction Company As A Contractor In Public-Private Partnership Projects. SIST 2024 - 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies, Proceedings. 2024. P. 473–481.
17. Рахмані М., Абдуллах Д., Шах С. Гібридний алгоритм багатокритеріальної оптимізації для підвищення енергоефективності будівель. *Energy and Buildings*. 2016. Вип. 127. С. 524–535.
18. Chupryna I., Tormosov R., Aryn A., Horbach M., Prykhodko D., Polzikov M. The Updated Tool for Selecting Projects for the Target Programs of Sustainable Energy Development. SIST 2023 - 2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies, Proceedings. 2023. P. 457–467.

19. Байнум П., Исса Р. Р., Олбіна С. Інформаційне моделювання будівель на підтримку сталого проектування та будівництва. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2013. Вип. 139, № 1. С. 24–34.

20. Рижаківа Г. М., Чуприна Ю. А. Формування будівельного кластеру у форматі державних інвестиційних цільових програм. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2019. Вип. 40. С. 19–24. URL: <http://ways.knuba.edu.ua/issue/view/11913>.

Стаття надійшла до редколегії 31.08.2025

Fedorchenko Mykola

Postgraduate Student at the Department of Information Technologies in Design and Applied Mathematics,

<https://orcid.org/0009-0009-0156-6042>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Katin Alexander

Postgraduate student of the Department of Information Technology Design and Applied Mathematics

<https://orcid.org/0009-0003-9356-4197>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED ANALYTICAL ENVIRONMENT FOR DETERMINING THE COMPREHENSIVE LEVEL OF BUILDING ENERGY EFFICIENCY

Abstract. The topic of building an integrated analytical space for determining the cumulative level of energy efficiency of a building is extremely relevant in the context of increased demands for energy saving in the construction sector. Rising energy prices, environmental challenges, and regulatory initiatives stimulate the need to create systems capable of accurately analyzing the energy efficiency of objects at all stages of their life cycle. Modern information technologies allow integrating vast amounts of data into a single environment – from structural features to behavioral models of energy consumption. The development of such a space involves combining architectural and design information with energy consumption parameters, operational data, climatic conditions, load scenarios, as well as information on energy-efficient measures. The use of Big Data analysis tools, machine learning, IoT, digital sensors, and platforms such as Building Management Systems (BMS) ensures deep digitalization of the evaluation process. Key to building such an analytical environment is the concept of a building's digital twin, which allows real-time modeling of energy processes, tracking deviations from normative indicators, and adapting energy management strategies. The integration of energy monitoring systems with the architectural BIM model ensures the creation of a full-fledged digital platform for efficiency management. The implementation of an integrated analytical space allows architects, engineers, developers, and operating organizations to make informed decisions regarding the choice of materials, technologies, and systems. This contributes not only to reducing energy consumption and costs, but also to reducing greenhouse gas emissions, supporting the goals of sustainable development and green building. The purpose of building such a space is to develop an intelligent system that automatically processes and analyzes all aspects of energy consumption, ensuring optimal energy efficiency indicators at all stages – from concept to operation.

Keywords: energy efficiency; integrated analytical space; energy modeling; big data; artificial intelligence; energy consumption; building technologies; energy optimization

References

1. Prystynska, I. V. (2017). Peculiarities of attribution of construction projects in the economic portfolio of a development company: Changing the paradigm and innovative asset management solutions for a construction organization. In *Ways to increase the efficiency of construction in the conditions of market relations*: Coll. Sci. Works (Vol. 35, Part 3, pp. 67–76). Kyiv: KNUBA.
2. Solow, R. (1980). On Theories of Unemployment. *American Economic Review*, 230.
3. Bushuyeva, N. S. (2007). *Models and methods of proactive management of organizational development programs*. Kyiv: Nauk. svit (Scientific World).
4. Ghaffarianhoseini, A., Beranadez, A., Matar, P., & Alvarador, A. (2017). Evaluation of building energy efficiency: A review of data-driven methods. *Energy and Buildings*, 153, 86–103.
5. Al-Ajmi, F., & Hanby, V. I. (2008). Energy consumption modeling for residential buildings in Kuwait. *Energy and Buildings*, 40 (6), 1101–1109.
6. Roman, A., Andrii, S., Galyna, R., Iurii, C., & Hanna, S. (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 (1), 40–50.
7. Crowley, D. B., Lofting, L. C., Knoll, W. D., & Pedersen, J. W. (2001). EnergyPlus: Creating a new generation program for building energy efficiency modeling. *Energy and Buildings*, 33 (4), 319–331.

8. Gonzales, P. A., & Zamarreño, J. M. (2005). Prediction of building energy consumption using a back-propagation artificial neural network. *Energy and Buildings*, 37 (6), 595–601.
9. Chupryna, G., Ryzhakova, V., Pokolenko, D., Prykhodko, D., & Faizullin, A. (2021). Establishment of the rational economic and analytical basis for projects in different sectors for their integration into the targeted diversified program for sustainable energy development. 2021 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), 1–9.
10. Hong, T., Chen, H., & Chablinksy, D. (2015). Commercial building energy saver: A tool for energy efficiency analysis of renovations. *Applied Energy*, 159, 298–309.
11. Wetter, M. (2002). GenOpt® – A universal optimization program. *Energy and Buildings*, 34 (9), 999–1005.
12. O'Donnell, J. T., Derkach, K. T., & Pollak, R. A. (2014). The role of BIM in green building design. *Automation in Construction*, 40, 126–135.
13. Sanguinetti, P., & Shen, W. (2012). Building information modeling and sustainability: Green design in Autodesk Revit. *Architectural Engineering and Design Management*, 8 (1), 28–39.
14. U.S. Department of Energy. (2016). *EnergyPlus engineering reference: A guide to EnergyPlus calculations*.
15. Zuo, J., & Zhao, Z. I. (2014). Green building research: Current status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 271–281.
16. Shpakova, H., Chupryna, I., Ivakhnenko, I., Zinchenko, M., & Plys, N. (2024). Tools for assessing the competitiveness of a construction company as a contractor in public-private partnership projects. *SIST 2024 – 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies, Proceedings*, 473–481.
17. Rahmani, M., Abdullah, D., & Shah, S. (2016). A hybrid multi-objective optimization algorithm for improving building energy efficiency. *Energy and Buildings*, 127, 524–535.
18. Chupryna, I., Tormosov, R., Aryn, A., Horbach, M., Prykhodko, D., & Polzikov, M. (2023). The updated tool for selecting projects for the target programs of sustainable energy development. *SIST 2023 - 2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies, Proceedings*, 457–467.
19. Bynum, P., Issa, R. R., & Olbina, S. (2013). Building information modeling in support of sustainable design and construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139 (1), 24–34.
20. Ryzhakova, H. M., & Chupryna, Yu. A. (2019). Formation of a construction cluster in the format of state investment target programs. *Ways to increase the efficiency of construction in the conditions of market relations*, 40, 19–24. <http://ways.knuba.edu.ua/issue/view/11913>.

Посилання на публікацію

- APA Fedorchenko, A., & Katin, A. (2025). Development of an integrated analytical environment for determining the comprehensive level of building energy efficiency. *Management of Development of Complex Systems*, 63, 201–211, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2025.63.201-211](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.63.201-211).
- ДСТУ Федорченко М. А., Катін О. А. Побудова інтегрованого аналітичного простору для виявлення сукупного рівня енергоефективності будівлі. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2025. № 63. С. 201 – 211, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2025.63.201-211](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.63.201-211).