

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

ІНФОРМАЦІЙНО-ПРОГРАМНІ МОДУЛІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ДОСЯГНЕННЯ ПРОЄКТНОЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЛІ

Інформаційно-програмні модулі підтримки прийняття рішень щодо досягнення проєктної енергоефективності будівлі розглядаються як інтегровані цифрові системи, що поєднують розрахункові алгоритми, багатofакторне моделювання та оптимізаційні процедури в єдиному аналітичному середовищі. Проєктна енергоефективність інтерпретується як інтегральна характеристика будівлі, сформована на стадії проектування та зумовлена теплотехнічними параметрами огорожувальних конструкцій, характеристиками інженерних систем і кліматичними умовами.

Основу інформаційно-програмного модуля становить формалізована модель теплового балансу, що враховує тепловтрати через огорожувальні конструкції, інфільтраційні втрати та сонячні теплоприливи. Для підвищення точності прогнозування використовується багатofакторна регресійна модель енергоспоживання, яка дозволяє визначити пріоритетність впливу окремих параметрів. У структурі програмного комплексу виділено блок введення даних, розрахунковий, сценарний, оптимізаційний та аналітичний модулі, об'єднані ітеративним інформаційним контуром.

Оптимізаційний блок реалізує багатокритеріальний підхід, у межах якого одночасно враховуються показники річного енергоспоживання, обсяг інвестицій та чиста приведена вартість. Формування множини Парето-ефективних альтернатив забезпечує раціональний вибір проєктного рішення з урахуванням енергетичної та економічної доцільності. Практична апробація модуля підтвердила можливість зниження питомого енергоспоживання до 41 % при оптимальному балансі між капітальними витратами та економічним ефектом.

Інтеграція алгоритмічних моделей, сценарного аналізу та економічної оцінки формує цифровий інструмент керування проєктною енергоефективністю в режимі реального часу. Отримані результати засвідчують доцільність переходу від ізованих теплотехнічних розрахунків до комплексних систем підтримки прийняття рішень, що забезпечують адаптивність і підвищену обґрунтованість проєктних рішень. Запропонований підхід створює передумови для формування інтелектуальних енергоефективних проєктів, орієнтованих на довгострокову експлуатаційну стабільність та відповідність сучасним стандартам сталого розвитку.



Ключові слова: *проектна енергоефективність, інформаційно-програмний модуль, підтримка прийняття рішень, тепловий баланс, багатокритеріальне моделювання, багатокритеріальна оптимізація, NPV, цифрове проектування.*

Вступ. Підвищення вимог до енергоефективності будівель у сучасних умовах зумовлює необхідність застосування інтегрованих цифрових інструментів підтримки прийняття проектних рішень. Формування проектної енергоефективності відбувається на етапі проектування та визначається сукупністю конструктивних, теплотехнічних і інженерних параметрів. Традиційні підходи до оцінювання енергоспоживання, що базуються на окремих теплотехнічних розрахунках, не забезпечують достатнього рівня комплексності та оперативності аналізу.

Сучасне проектування потребує переходу до інтегрованих інформаційно-програмних модулів, здатних поєднувати моделі теплового балансу, регресійний аналіз і оптимізаційні алгоритми. Такий підхід дозволяє формувати множину альтернативних проектних рішень та оцінювати їх за енергетичними й економічними критеріями.

Розвиток цифрових технологій, інтеграція з інформаційними моделями будівель та можливість ітеративного перерахунку параметрів створюють передумови для формування адаптивного середовища управління проектною енергоефективністю. Це забезпечує підвищення точності прогнозування та обґрунтованість вибору оптимальних конструктивних і інженерних рішень.

Актуальність тематики зумовлена зростанням нормативних вимог до енергоефективності та необхідністю мінімізації енергоспоживання ще на стадії проектування. Умови кліматичної нестабільності та підвищення вартості енергоресурсів підсилюють потребу в застосуванні інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Існуючі методики часто мають фрагментарний характер і не забезпечують комплексного врахування теплотехнічних, економічних та експлуатаційних факторів. Інформаційно-програмні модулі дозволяють інтегрувати розрахункові моделі, сценарний аналіз та багатокритеріальну оптимізацію в єдину цифрову систему, що підвищує достовірність прогнозів і скорочує час аналізу альтернатив.

Постановка проблеми. Незважаючи на наявність численних теплотехнічних методик та програмних продуктів для моделювання енергоспоживання, проблема інтегрованого прийняття проектних рішень залишається актуальною. Окремі розрахункові інструменти не забезпечують системної координації між енергетичними, економічними та експлуатаційними параметрами будівлі.

Відсутність багатокритеріального підходу ускладнює вибір оптимального варіанта серед множини альтернатив, особливо в умовах обмежених інвестиційних ресурсів. Необхідним є формування єдиного інформаційно-програмного середовища, яке забезпечує інтеграцію розрахункових моделей, сценарного аналізу та економічної оцінки у межах замкненого аналітичного контуру.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження зосереджені на вдосконаленні моделей теплового балансу, використанні регресійних методів прогнозування та застосуванні багатокритеріальної оптимізації у проектуванні енергоефективних будівель. Активно розвиваються підходи до simulation-based optimization та інтеграції моделей у цифрове середовище проектування.

Водночас потребує подальшого розвитку концепція інформаційно-програмних модулів як цілісних систем підтримки прийняття рішень, що об'єднують розрахункові, аналітичні та оптимізаційні інструменти в межах єдиної архітектури.

Метою статті є розроблення та обґрунтування структури й функціональних принципів інформаційно-програмного модуля підтримки прийняття рішень щодо досягнення проектної енергоефективності будівлі, який забезпечує інтеграцію теплотехнічних розрахунків, багатофакторного моделювання та багатокритеріальної оптимізації в єдиному цифровому середовищі.

Виклад основної інформації. Проектна енергоефективність будівлі визначається як інтегральна характеристика її здатності забезпечувати нормативний або цільовий рівень енергоспоживання за умови реалізації закладених у проєкті конструктивних і інженерних параметрів. На відміну від фактичної експлуатаційної ефективності, вона формується на етапі проєктування та залежить від теплотехнічних властивостей огорожувальних конструкцій, архітектурно-планувальних рішень, характеристик інженерних систем та кліматичних умов регіону [1].

Базовою величиною для оцінювання проектної енергоефективності виступає річна потреба в тепловій енергії, яка визначається залежністю:

$$Q = U \times A \times \Delta T \times t, \quad (1)$$

де Q – річні тепловтрати, кВт·год; U – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²·К; A – площа огорожувальної конструкції, м²; ΔT – середня різниця температур внутрішнього та зовнішнього повітря; t – тривалість опалювального періоду.

Аналіз наведеної залежності свідчить про лінійний характер впливу коефіцієнта теплопередачі на величину тепловтрат. Графічна інтерпретація цієї залежності наведена на рис. 1.

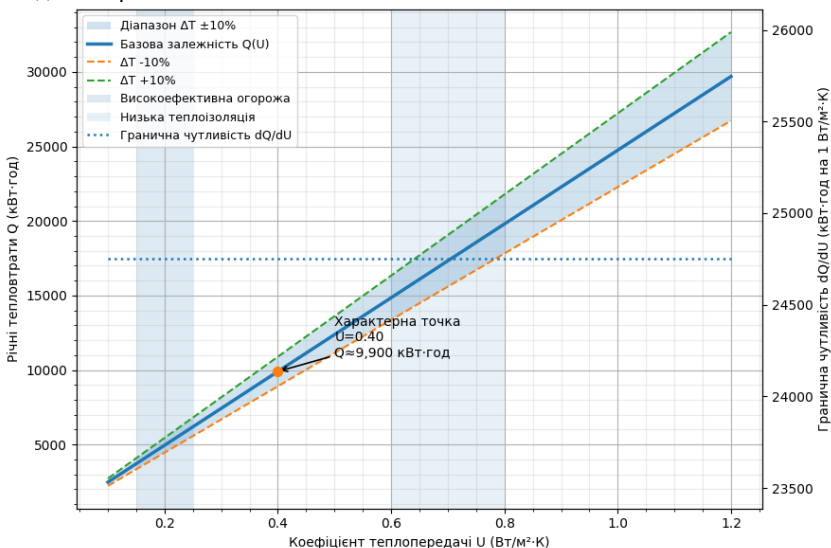


Рис. 1. Залежність тепловтрат від коефіцієнта теплопередачі (розроблено автором на основі [1])

Інтегральний показник питомого енергоспоживання будівлі визначається як:

$$E_{spec} = \frac{Q}{A_{floor}}, \quad (2)$$

де A_{floor} – опалювана площа будівлі.

Для підвищення точності прогнозування використовується багатofакторна модель енергоспоживання:

$$E = \beta_0 + \beta_1 \times U + \beta_2 \times ACH + \beta_3 \times SHGC, \quad (3)$$

де ACH – кратність повітрообміну; $SHGC$ – коефіцієнт сонячних теплоприпливів; β_i – емпіричні коефіцієнти моделі.

Загальна потреба в енергії інженерних систем визначається залежністю:

$$E_{total} = E_{heat} + E_{cool} + E_{vent}, \quad (4)$$

Вплив кратності повітрообміну на енергоспоживання має квазілінійний характер у межах нормативного діапазону [2]. Відповідна графічна залежність наведена на рис. 2.

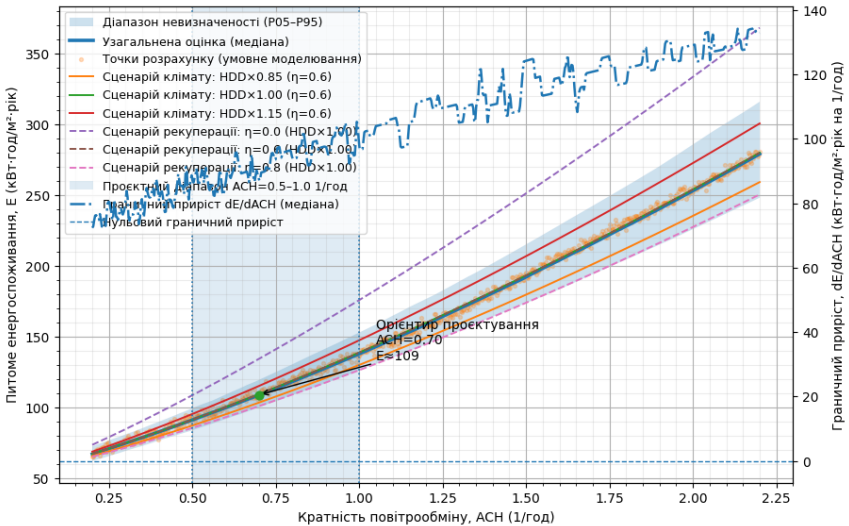


Рис. 2. Залежність енергоспоживання від кратності повітрообміну (розроблено автором на основі [2])

Порівняльний аналіз базового та оптимізованого варіантів проєктних рішень демонструє зниження енергоспоживання зі збільшенням рівня теплоізоляції. Графічне порівняння сценаріїв представлено на рис. 3.

Оптимізаційна задача формулюється як мінімізація сумарного енергоспоживання будівлі:

$$F = \min(E_{total}), \quad (5)$$

Однак прийняття проєктного рішення повинно враховувати економічну складову, що визначається показником чистої приведеної вартості:

$$NPV = \sum \left(\frac{CF_t}{(1+r)^t} \right), \quad (6)$$

де CF_t – грошовий потік у періоді t ; r – ставка дисконту.

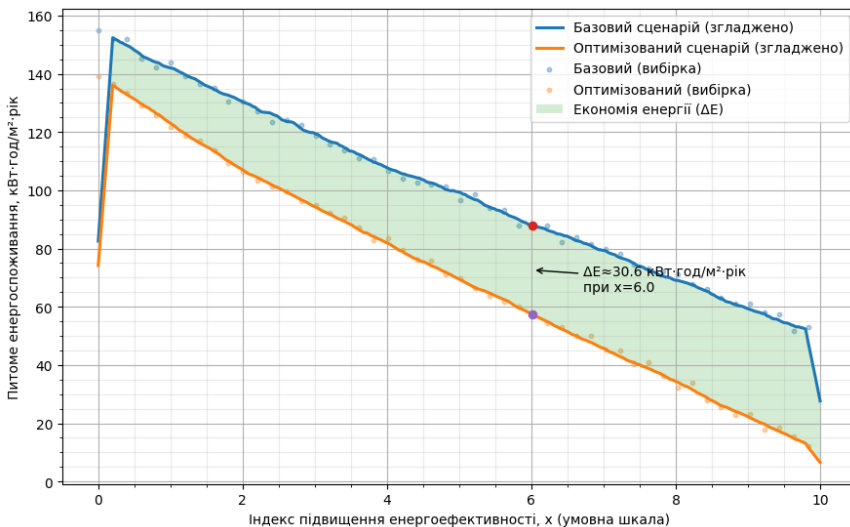


Рис. 3. Порівняння базового та оптимізованого сценаріїв енергоспоживання (розроблено автором на основі [2])

Аналіз залежності між рівнем інвестицій у теплоізоляцію та величиною NPV свідчить про наявність оптимальної точки, що відповідає максимальному економічному ефекту [3]. Відповідна графічна інтерпретація наведена на рис. 4.

Цифрова трансформація проєктування зумовлює необхідність переходу від ізольованих теплотехнічних розрахунків до інтегрованого середовища підтримки прийняття рішень. У цьому контексті інформаційно-програмний модуль розглядається як багаторівнева система, що поєднує розрахункові алгоритми, аналітичні інструменти та механізми оптимізації в межах єдиної логіки обробки даних.

Функціонально така система базується на послідовній трансформації вхідної інформації (геометричні параметри будівлі, теплотехнічні характеристики матеріалів, кліматичні дані, параметри інженерних систем) у вихідні управлінські рішення, спрямовані на досягнення цільового рівня енергоефективності [4]. Архітектурно програмний комплекс формує замкнений контур «вхідні дані – розрахунок – сценарний аналіз – оптимізація – аналітичний висновок».

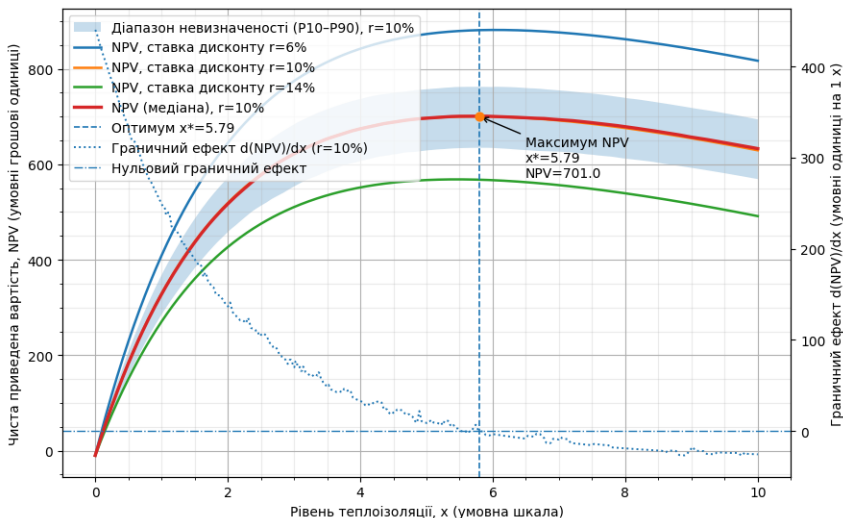


Рис. 4. Залежність чистої приведеної вартості від рівня теплоізоляції (розроблено автором на основі [3])

Структурну модель інформаційно-програмного модуля наведено на рис. 5.

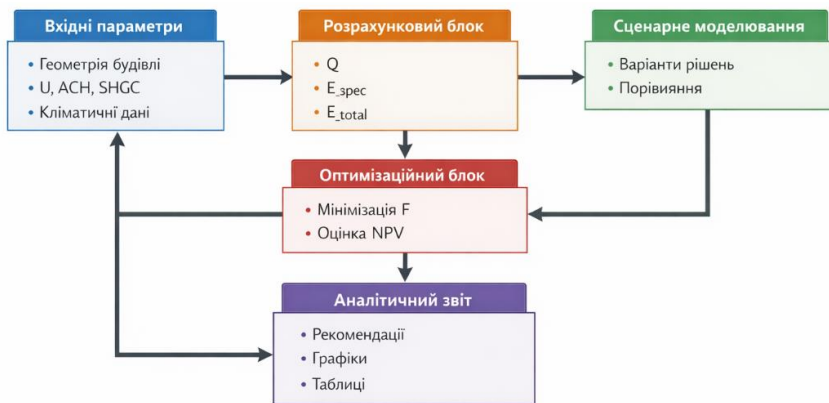


Рис. 5. Структура інформаційно-програмного модуля підтримки прийняття рішень щодо проектної енергоефективності (розроблено автором на основі [4])

Як випливає зі схеми, розрахунковий блок виконує первинну оцінку енергетичних параметрів, після чого результати передаються до підсистеми сценарного аналізу. Остання формує альтернативні конфігурації конструктивних і інженерних рішень. Оптимізаційний блок здійснює багатокритеріальний вибір варіанта з урахуванням мінімізації енергоспоживання та економічної доцільності.

Функціональне наповнення окремих компонентів системи наведено у таблиці 1. Інформаційні потоки між модулями мають ітеративний характер. Зміна будь-якого параметра автоматично ініціює повторний перерахунок, що забезпечує динамічну актуалізацію результатів. Такий підхід дозволяє проєктувальнику оцінювати наслідки прийнятих рішень у режимі реального часу.

Важливою характеристикою системи є її інтегрованість із цифровими моделями будівлі, що забезпечує синхронізацію геометричних та енергетичних параметрів. Це створює передумови для переходу від статичних розрахунків до адаптивного моделювання, у межах якого проєктна енергоефективність стає керованим параметром.

Таблиця 1

Функціональне наповнення інформаційно-програмних модулів

Модуль	Вхідні дані	Основні операції	Вихідні результати
Блок введення даних	Геометрія, матеріали, клімат	Перевірка коректності, нормалізація	Узгоджений масив параметрів
Розрахунковий	U, A, ΔT, t, ACH	Теплотехнічні та енергетичні розрахунки	Q, E_spec, E_total
Сценарний	Альтернативні варіанти конструкцій	Порівняльний аналіз	Матриця варіантів
Оптимізаційний	Результати розрахунків	Мінімізація F, оцінка NPV	Оптимальний варіант
Аналітичний	Оптимізовані параметри	Формування звіту	Таблиці, графіки, рекомендації

Джерело: розроблено автором на основі [4]

Формування проєктної енергоефективності будівлі ґрунтується на застосуванні формалізованих розрахункових моделей, які дозволяють кількісно описати енергетичні процеси, що відбуваються у системі «огороджувальні конструкції – внутрішнє середовище – інженерні мережі». Сучасні підходи до енергетичного моделювання будівель базуються на поєднанні теплотехнічного балансу, динамічного прогнозування та багатофакторного аналізу [5].

Узагальнене рівняння теплового балансу будівлі може бути подане як:

$$Q_{balance} = Q_{loss} - Q_{gain}, \quad (7)$$

де $Q_{balance}$ – чиста потреба в тепловій енергії; Q_{loss} – сумарні тепловтрати; Q_{gain} – теплоприпливи (внутрішні та сонячні).

Сумарні тепловтрати формуються за рахунок теплопередачі через огороджувальні конструкції та втрат внаслідок інфільтрації повітря:

$$Q_{loss} = \Sigma(U_i \times A_i \times \Delta T \times t) + Q_{inf}, \quad (8)$$

де U_i – коефіцієнт теплопередачі i-ої конструкції; A_i – площа відповідної поверхні; ΔT – температурна різниця; t – тривалість розрахункового періоду; Q_{inf} – інфільтраційні втрати.

Інфільтраційна складова визначається залежною:

$$Q_{inf} = 0.33 \times ACH \times V \times \Delta T \times t, \quad (9)$$

де АСН – кратність повітрообміну; V – внутрішній об’єм приміщення; 0.33 – коефіцієнт теплоємності повітря.

Залежність тепловтрат від кратності повітрообміну має лінійний характер у межах нормативного діапазону, що підтверджується результатами чисельного моделювання (див. рис. 6) [5].

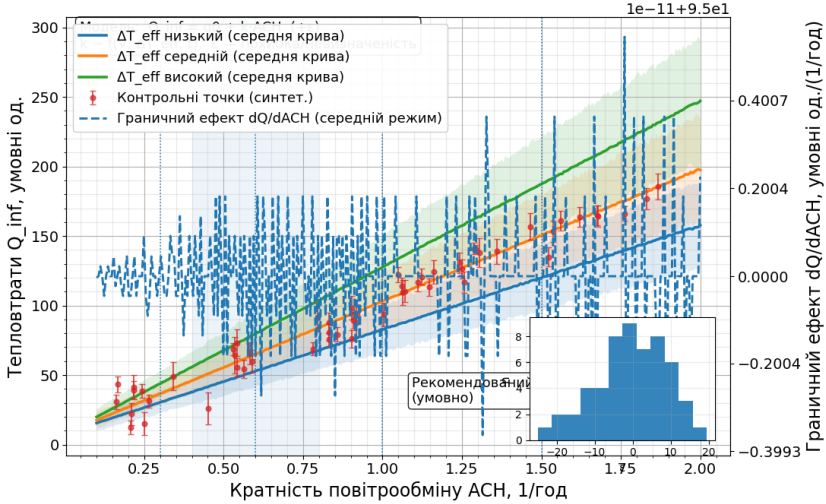


Рис. 6. Залежність тепловтрат від кратності повітрообміну (розроблено автором на основі [5])

Сонячні теплоприпливи визначаються як:

$$Q_{solar} = SHGC \times A_{glass} \times I_{solar}, \quad (10)$$

де SHGC – коефіцієнт сонячного пропускання; A_{glass} – площа застління; I_{solar} – інтенсивність сонячної радіації.

У межах комплексного підходу річне енергоспоживання будівлі подається як:

$$E_{total} = E_{heat} + E_{cool} + E_{vent} + E_{light}, \quad (11)$$

З огляду на багатопараметричний характер задачі доцільним є застосування багатфакторної регресійної моделі прогнозування [6]:

$$E = \beta_0 + \beta_1 \times U + \beta_2 \times АСН + \beta_3 \times SHGC + \beta_4 \times A_{glass}, \quad (12)$$

Коефіцієнти β_i визначають ступінь впливу відповідних параметрів на інтегральний показник енергоспоживання. Аналіз їх величин дозволяє встановити пріоритетність управлінських впливів.

Нелінійність взаємодії факторів зумовлює появу ефекту насичення, коли подальше зменшення коефіцієнта теплопередачі дає зменшений енергетичний ефект через домінування інших складових балансу. Це відображено на рис. 7.

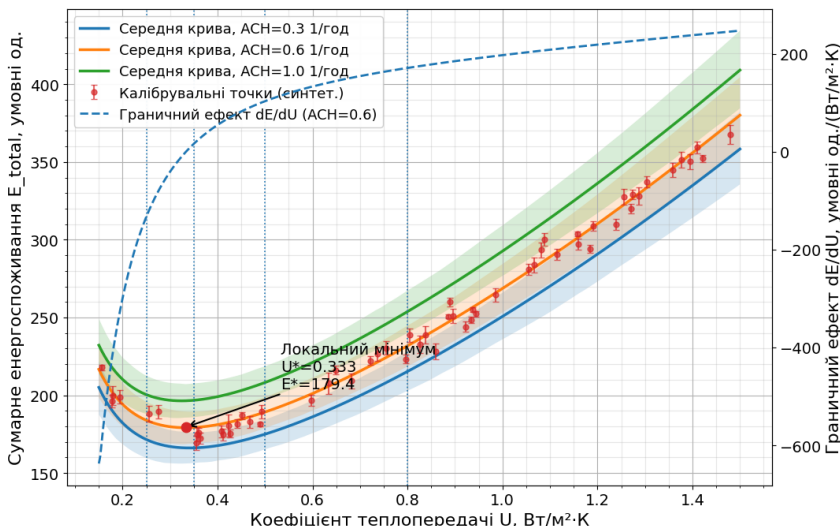


Рис. 7. Залежність сумарного енергоспоживання від коефіцієнта теплопередачі (розроблено автором на основі [6])

Застосування сценарного моделювання дозволяє сформуванню множини альтернативних проектних рішень $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$.

Для кожного сценарію визначається вектор показників:

$$P_i = (E_{total}, C_{invest}, NPV, Class), \quad (13)$$

що створює інформаційну основу для подальшої оптимізації.

Важливою особливістю сучасних цифрових моделей є можливість стохастичного врахування кліматичних коливань та режимів експлуатації, що підвищує достовірність прогнозу [7]. Таким чином, розрахунковий блок інформаційно-програмного модуля трансформується з інструмента статичного обчислення у систему прогнозування з адаптивною корекцією параметрів.

Комплексне поєднання теплотехнічного балансу, регресійного аналізу та сценарного моделювання забезпечує кількісно обґрунтоване прийняття рішень щодо досягнення проектної енергоефективності ще на стадії формування проектних рішень.

Після формування розрахункової моделі та отримання множини альтернативних сценаріїв наступним етапом є формалізація процедури вибору оптимального проектного рішення. Оптимізаційний блок інформаційно-програмного модуля реалізує багатокритеріальний підхід, у межах якого враховуються енергетичні, економічні та експлуатаційні показники, що узгоджується з сучасними підходами до прийняття рішень у сфері енергоефективного проектування [8].

Формально задача оптимізації може бути представлена у вигляді цільової функції:

$$\min F(x) = w_1 E_{total}(x) + w_2 C_{invest}(x) - w_3 NPV(x), \quad (14)$$

де x – вектор проектних параметрів; E_{total} – річне енергоспоживання; C_{invest} – капітальні інвестиції; NPV – чиста приведена вартість; w_i – вагові коефіцієнти.

У випадку багатокритеріальної оптимізації формується множина Парето-ефективних рішень:

$$X^* = \{x \in X \mid \nexists y \in X: F(y) < F(x)\}, \quad (15)$$

Такий підхід дозволяє ідентифікувати варіанти, для яких неможливо одночасно покращити один критерій без погіршення іншого, що відповідає концепції раціонального вибору у системах підтримки прийняття рішень [9].

Оптимізаційна процедура має ітераційний характер і включає формування сценаріїв, розрахунок критеріїв, нормалізацію показників, ранжування альтернатив та вибір оптимального варіанта. Узагальнений алгоритм наведено на рис. 8.

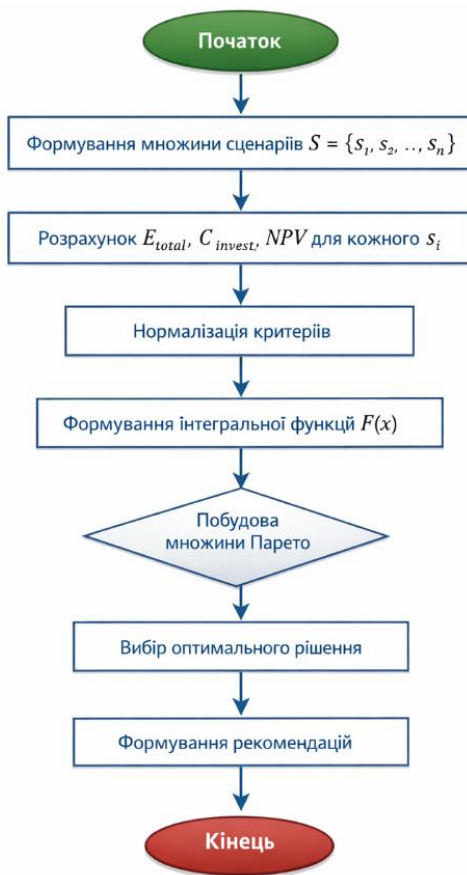


Рис. 8. Алгоритм багатокритеріальної оптимізації проектних рішень (розроблено автором на основі [9])

Інтеграція алгоритмічного підходу в цифрове середовище забезпечує автоматизований аналіз великої кількості альтернативних конфігурацій огорожувальних конструкцій та інженерних систем, що відповідає сучасним концепціям енергоефективного проектування [10]. Можливість адаптивної зміни вагових коефіцієнтів дозволяє враховувати стратегічні пріоритети інвестора – мінімізацію строку окупності, максимізацію класу енергоефективності або зниження експлуатаційних витрат.

Практична апробація інформаційно-програмного модуля виконана для адміністративної будівлі площею 3000 м². Початкове питоме енергоспоживання становило 140 кВт·год/м²·рік (клас D). У процесі оптимізаційного аналізу було сформовано 12 альтернативних сценаріїв модернізації огорожувальних конструкцій і систем життєзабезпечення.

Результати порівняльного аналізу наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняльна оцінка сценаріїв оптимізації

Сценарій	E total, кВт·год/м²·рік	C invest, тис. грн	NPV, тис. грн	Клас
Базовий	140	0	–	D
S1	112	850	320	C
S2	95	1240	540	B
S3	82	1680	610	B
S4	70	2350	580	A

Джерело: розроблено автором на основі [10]

Аналіз показав, що сценарій S3 забезпечує оптимальний баланс між енергетичною ефективністю та економічною доцільністю. Зниження питомого енергоспоживання становить 41 %, а строк окупності інвестицій – 4,8 року. Сценарій S4 дозволяє досягти класу А, однак супроводжується зростанням капітальних витрат і зменшенням економічної ефективності.

Отримані результати підтверджують, що використання систем підтримки прийняття рішень у сфері енергоефективного проектування дозволяє суттєво підвищити обґрунтованість управлінських рішень, мінімізувати ризики та скоротити час аналізу альтернатив [11]. Інтеграція розрахункових моделей, оптимізаційних алгоритмів та економічного аналізу формує комплексний цифровий інструмент управління проектною енергоефективністю.

Висновок. Інформаційно-програмні модулі підтримки прийняття рішень виступають ключовим інструментом забезпечення проектної енергоефективності будівель у сучасному цифровому середовищі. Їх застосування дозволяє інтегрувати теплотехнічний баланс, багатofакторні моделі прогнозування та економічний аналіз у єдину систему обґрунтування проектних рішень.

Реалізація багатокритеріальної оптимізації з урахуванням показників енергоспоживання, капітальних витрат і чистої приведеної вартості формує основу для раціонального вибору Парето-ефективних альтернатив. Ітеративний характер розрахунків та інтеграція з цифровими моделями будівлі забезпечують оперативність коригування параметрів і підвищують адаптивність системи.

Практична апробація підтвердила, що використання модуля дозволяє досягти значного зниження питомого енергоспоживання при оптимальному співвідношенні інвестицій і економічного ефекту. Отримані результати засвідчують перспективність розвитку інтегрованих систем підтримки прийняття рішень як

основи формування енергоефективних та економічно обґрунтованих проектних рішень у будівництві.

Список літератури:

1. Attia S., Hensen J.L.M., Beltrán L., De Herde A. Selection criteria for building performance simulation tools: contrasting architects' and engineers' needs. *Journal of Building Performance Simulation*, 2012, 5(3), 155–169. <https://doi.org/10.1080/19401493.2010.549573>.
2. Ma Z., Cooper P., Daly D., Ledo L. Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 55. P. 889–902. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018>.
3. Wang L., Gwilliam J., Jones P. Case study of zero energy house design in UK. *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41(11). P. 1215–1222. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.001>.
4. Hensen J.L.M., Lamberts R. *Building Performance Simulation for Design and Operation*. London: Spon Press, 2011. 536 p.
5. Li C., Chen Yo. Modeling and optimization method for building energy performance in the design stage. *Journal of Building Engineering*, 2024, Vol. 87, 109019. <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2024.109019>.
6. Czerwoniec A., Torzewicz T., Samson A., Janicki M. Estimation of heat transfer coefficient temperature dependence from cooling curve measurements. *22nd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems (MIXDES)*, Torun, Poland, 2015, pp. 422–425. DOI: 10.1109/MIXDES.2015.7208555.
7. Abu Saleh Md., Rasel H.M., Ray B. A comprehensive review towards resilient rainfall forecasting models using artificial intelligence techniques. *Green Technologies and Sustainability*, 2024, Vol. 2, Issue 3, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2024.100104>.
8. Wang L., Zmeureanu R., Rivard H. Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Building and Environment*. 2005. Vol. 40(11). P. 1512–1525. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.11.017>.
9. Chernyshev D., Ryzhakova G., Honcharenko T., Petrenko H., Chupryna I., Reznik N. Digital Administration of the Project Based on the Concept of Smart Construction. In: Alareeni, B., Hamdan, A. (eds) *Explore Business, Technology Opportunities and Challenges After the Covid-19 Pandemic*. ICBT 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, 2023, Vol. 495. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08954-1_114.
10. Nguyen A.-T., Reiter S., Rigo P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*. 2014. Vol. 113. P. 1043–1058. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>.
11. Рижакова Г., Приходько Д., Поколенко В., Петруха Н., Чуприна Ю., Хоменко О. Оновлення науково-методичних підходів до побудови полікритеріальної системи адміністрування діяльністю підприємств-стейкхолдерів проєктів будівництва. *Просторовий розвиток*, 2022, 1, 218–233. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2022.1.218-233>.

Mykola FEDORENKO

Information and software modules for decision support in achieving design energy efficiency of buildings

Information and software decision-support modules for achieving design energy efficiency of buildings are considered as integrated digital systems that combine computational algorithms, multifactor modeling, and optimization procedures within a unified analytical environment. Design energy efficiency is interpreted as an integral characteristic of a building, formed at the design stage and determined by the thermal performance parameters of envelope structures, engineering system characteristics, and regional climatic conditions.

The core of the information and software module is a formalized thermal balance model that accounts for heat losses through envelope structures, infiltration losses, and solar heat gains. To improve forecasting accuracy, a multifactor regression model of energy consumption is applied, enabling the identification of priority parameters influencing overall performance. The structure of the software complex includes a data input block, computational module, scenario analysis module, optimization module, and analytical module, integrated through an iterative information loop.

The optimization module implements a multi-criteria approach that simultaneously considers annual energy consumption, investment costs, and net present value. The formation of a set of Pareto-efficient alternatives ensures the rational selection of design solutions based on both energy performance and economic feasibility. Practical implementation of the module confirmed the possibility of reducing specific energy consumption by up to 41% while maintaining an optimal balance between capital expenditures and economic return.

The integration of algorithmic models, scenario analysis, and economic evaluation forms a digital tool for managing design energy efficiency in real time. The results demonstrate the feasibility of transitioning from isolated thermal calculations to comprehensive decision-support systems that ensure adaptability and enhanced justification of design solutions. The proposed approach creates prerequisites for developing intelligent energy-efficient projects focused on long-term operational stability and compliance with modern sustainable development standards.

Keywords: design energy efficiency, information and software module, decision support, thermal balance, multifactor modeling, multi-criteria optimization, NPV, digital design.

Дата надходження статті: 13.01.2026

Дата прийняття статті: 12.02.2026