

КРИТЕРІЇ ТА АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМНО ІНТЕГРОВАНОЇ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ СУЧАСНОГО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО БУДІВНИЦТВА

D. Halushko¹ <https://orcid.org/0009-0008-9451-9343>

¹ Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine

CRITERIA AND ALGORITHM OF OPERATION OF THE SYSTEMICALLY INTEGRATED MODEL OF OPTIMIZATION OF MODERN ENERGY-EFFICIENT CONSTRUCTION

Мета. Розрахунок параметрів ефективності системно інтегрованої організаційно-технологічної моделі енергоефективного будівництва шляхом визначення оптимальних технологічних рішень, що передбачає дослідження взаємодії організаційних, технологічних та енергетичних процесів і визначення критеріїв, які формують адаптивність, технологічну стійкість та енергоефективність будівельної системи.

Методика. Розрахунок базується на комплексному аналізі параметрів моделі з використанням методів багатокритеріальної оптимізації, системного аналізу, математичного моделювання та алгоритмізації енергоефективних процесів. Розроблена інтегрована методика поєднує принципи енергоощадності, оптимального управління ресурсами та забезпечення технологічної надійності, що дозволяє всебічно оцінити функціонування будівельної системи.

Результати. Отримані показники характеризують ефективність моделі, ступінь інтеграції технологічних рішень та рівень оптимізації енерговитрат у будівельних процесах. Сформована система кількісних параметрів забезпечує можливість об'єктивно оцінити результативність організаційно-технологічної моделі та визначити напрямки підвищення енергоефективності.

Наукова новизна. Виявлено залежності між структурою моделі, енергетичними параметрами та оптимізаційними алгоритмами, що забезпечує формалізацію процесу створення системно інтегрованих рішень у будівництві. Результати розширюють наукові підходи до проектування енергоефективних будівель і створюють підґрунтя для подальших досліджень у сфері інтегрованих організаційно-технологічних систем.

Практична значимість. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації управління будівельними процесами, розробки енергоефективних технологічних схем, проектування ресурсозберігаючих систем і впровадження автоматизованих алгоритмічних рішень. Використання результатів сприяє підвищенню ефективності сучасних будівельних систем і раціональному використанню енергетичних ресурсів.

Ключові слова: системно інтегрована модель, оптимізація, енергоефективне будівництво, алгоритм, технологічні рішення, критерії ефективності, організаційно-технологічні системи.

Вступ. Проблематика підвищення енергоефективності у сучасному будівництві займає ключове місце в контексті розвитку світової будівельної галузі,

оскільки безпосередньо пов'язана з виконанням міжнародних екологічних програм, державних стратегій енергозбереження та переходом до ресурсоефективної економіки. Сучасні будівельні об'єкти характеризуються зростаючою технічною складністю, високим рівнем вимог до енергоощадності, а також необхідністю комплексної інтеграції інженерних, технологічних і організаційних рішень, що потребує застосування системного підходу до планування й оптимізації будівельних процесів. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває створення системно інтегрованих моделей, здатних забезпечити ефективне управління енергетичними потоками та раціональне використання ресурсів на всіх етапах зведення об'єктів [1].

Аналіз наукових досліджень засвідчує, що значний внесок у формування теоретичного підґрунтя оптимізації будівельних процесів зробили праці в галузях системного аналізу, математичного моделювання, енергоефективного проєктування, BIM-технологій та багатокритеріальної оптимізації [1–5].

У роботі [1] акцентовано увагу на формуванні та реалізації енергоефективної політики в цивільному будівництві. Автори підкреслюють необхідність узгодження будівельної діяльності з принципами сталого розвитку, а також доводять, що впровадження енергоощадних технологій потребує системного підходу до планування, проєктування та експлуатації будівель. Важливим результатом дослідження є виділення ролі комплексного енергетичного аналізу як основи для подальшої оптимізації технологічних рішень.

Значний інтерес у контексті сучасних підходів до оптимізації будівельних процесів становить дослідження [2], у якому запропоновано порівняльну оцінку двох методів аналізу ризиків на прикладі проєкту висотної офісної будівлі. Автори розглядають ризики як структурну складову контрактного управління та демонструють, що традиційна матриця ризиків, попри поширеність у професійній практиці, має обмежену аналітичну здатність через високий рівень суб'єктивності та неможливість відобразити статистичну варіативність параметрів. На противагу цьому, застосування моделювання методом Монте-Карло дає змогу отримати імовірнісні розподіли ключових показників проєкту та врахувати кореляційні залежності між ризиковими факторами. Такий підхід дозволяє формувати більш обґрунтовані управлінські рішення щодо термінів виконання, бюджетного резервування та оцінки можливих відхилень у ході реалізації будівельних робіт. Результати дослідження свідчать про доцільність переходу від якісних статичних моделей до кількісних стохастичних інструментів, що підвищують точність прогнозування в умовах невизначеності. Робота [2] узгоджується з ширшим науковим напрямом, у межах якого ключовими є системний аналіз, математичне моделювання та багатокритеріальна оптимізація. Автори розглядають ризики у взаємозв'язку з основними параметрами будівельного процесу, що відповідає системному підходу та дозволяє інтегрувати результати моделювання у процеси планування і контролю. Методична основа дослідження сумісна з цифровими платформами управління будівництвом, де імовірнісні сценарні моделі можуть бути використані для автоматизації аналітичних процедур. Загалом автори підкреслюють важливість використання сучасних інструментів кількісного аналізу

ризиків для підвищення ефективності та надійності будівельних процесів і може розглядатися як вагомий внесок у формування теоретико-методологічної бази оптимізації в будівельній галузі.

Дослідження [3] поглиблює зазначені ідеї, пропонуючи механізм вибору організаційно-технологічних рішень на основі інтегрованого управління будівельним процесом. Дослідники доводять доцільність застосування багатокритеріальних методів оцінювання, які враховують вартість, терміни, надійність і ресурсну ефективність технологічних альтернатив. Представлений механізм органічно узгоджується з концепцією системної оптимізації.

У статті [4] досліджуються системоутворювальні чинники ціннісно-орієнтованого менеджменту. Автори визначають комплекс параметрів, що впливають на організаційну структуру проєкту та поведінку його учасників: від характеристик команди й пріоритетів замовника до технологічних ризиків і зовнішніх умов. Підкреслюється, що ефективна оптимізація будівельних процесів потребує врахування управлінських та поведінкових факторів поряд із технічними аспектами.

Публікація [5] демонструє практичну сторону оптимізації, пов'язану з впровадженням цифрових технологій та ІТ-інструментів, зокрема BIM-моделювання, автоматизованих систем контролю та ресурсного планування. Автори показують, що цифровізація покращує точність технологічних розрахунків, підвищує ефективність логістики та забезпечує основу для формування інтегрованих моделей управління будівництвом.

Узагальнюючи результати аналізу джерел [1–5], можна відзначити, що вони формують цілісну концептуальну основу, у межах якої сучасні підходи до оптимізації будівельних процесів розглядаються як багаторівневий та міждисциплінарний напрям. У працях простежується поєднання стратегічних аспектів енергоефективної політики, методологічних принципів управління якістю, багатокритеріального аналізу технологічних рішень, ціннісно-орієнтованого управління будівельними проєктами та цифрових інструментів підтримки рішень. Спільною рисою цих досліджень є акцент на необхідності системного бачення будівельного процесу, де технічні, організаційні та інформаційні компоненти функціонують як єдина оптимізаційна структура. Такий підхід формує підґрунтя для створення інтегрованих моделей управління в енергоефективному будівництві, що базуються на комплексному аналізі параметрів, ризиків, ресурсів та цифрових даних.

Зокрема, дослідження, присвячені інтеграції інформаційних моделей, моделюванню енергетичних характеристик будівель, впровадженню автоматизованих систем управління та підвищенню технологічної надійності, заклали основу для розвитку сучасних методів оптимізації [6–9].

У дослідженні [6] увагу зосереджено на механізмах ризик-менеджменту в умовах підвищеної невизначеності, що є характерною рисою сучасних будівельних підприємств. Автори підкреслюють важливість врахування комплексного профілю ризиків для підвищення ефективності організаційних і технологічних рішень.

У роботі [7] представлено методи оцінки й обґрунтування раціональних організаційно-технологічних рішень, особливо для складних об'єктів, таких як висотні багатофункціональні комплекси. Наголошено на необхідності системної оцінки параметрів проєкту та порівняння конструктивно-технологічних альтернатив.

Публікація [8] акцентує на формуванні нечіткої бази знань у системах підтримки прийняття рішень у сфері технічного регулювання будівельної діяльності. Використання нечіткої логіки дає змогу враховувати нечітко визначені параметри й експертні оцінки, що підвищує адаптивність оптимізаційних алгоритмів.

Монографія [9] пропонує широке бачення розвитку будівельної галузі України. У ній охоплено організаційні, технологічні, економічні та інноваційні чинники, що формують потенціал розвитку будівництва.

У комплексі джерела [6–9] свідчать про важливість системного підходу, урахування багатofакторності, застосування інтелектуальних методів та розширення інформаційно-аналітичної бази оптимізації будівельних процесів.

Низка авторів також зосереджується на оцінюванні енергетичних характеристик будівель, дослідженні впливу технологічних рішень на кінцеві енерговитрати та визначенні ефективності інженерних систем [10–13].

У роботі [10] проведено ґрунтовний бібліометричний аналіз розвитку багатокритеріальних методів оцінювання будівельної продуктивності, що дозволяє визначити ключові тенденції еволюції оптимізаційних моделей, пов'язаних з енергоспоживанням, комфортом та експлуатаційною ефективністю. Дослідження засвідчує широке застосування алгоритмів NSGA-II, PSO та інших еволюційних методів, які формують основу сучасних підходів до оптимізації.

У статті [11] зосереджено увагу на використанні багатокритеріальної оптимізації у проєктуванні зелених будівель. Запропонований методологічний підхід дає змогу одночасно оптимізувати параметри енергоспоживання, природного освітлення та теплового комфорту, забезпечуючи баланс між екологічними та експлуатаційними характеристиками. Робота підкреслює важливість інтегрованих моделей, здатних враховувати взаємний вплив конструктивних рішень на енергетичні показники будівлі.

У дослідженні [12] розглянуто енергетичну ефективність з урахуванням стохастичності поведінки користувачів. Запропонована модель дозволяє оцінити вплив випадкових дій мешканців на кінцеві енерговитрати та значно підвищує точність прогнозування. Такий підхід розширює уявлення про реальні чинники формування енергетичних характеристик будівель і є важливим складником сучасних оптимізаційних алгоритмів.

Стаття [13] присвячена оптимізації форми та конструктивних параметрів фасадних систем у процесі модернізації будівель. Наведені результати демонструють, як поєднання параметричної геометрії та енергоефективних матеріалів дозволяє мінімізувати теплові втрати та підвищити загальну ефективність огорожувальних конструкцій. Дослідження підтверджує доцільність використання геометричних оптимізацій у реноваційних проєктах.

У цілому роботи [10–13] відображають сучасні підходи до формування енергоефективних рішень, що базуються на багатокритеріальній оптимізації, параметричному моделюванні та врахуванні поведінкових і конструктивних чинників. Вони свідчать, що підвищення точності прогнозування енергоспоживання та ефективності інженерних систем можливе лише за умови комплексної інтеграції алгоритмічних, архітектурно-технічних та експлуатаційних складових.

Разом з тим аналіз наукових праць [2–13] свідчить про наявність низки невирішених аспектів. Зокрема, недостатньо розробленими залишаються питання комплексної інтеграції організаційних і технологічних параметрів у єдину оптимізаційну модель; відсутні універсальні алгоритми, що здатні одночасно враховувати енергетичні, технологічні, структурні та організаційні показники; обмеженим є застосування багатокритеріальної оптимізації у практичних схемах управління будівельними процесами. Також практично не висвітлено питання формалізації критеріїв вибору оптимальних технологічних рішень у динамічних умовах функціонування будівельного виробництва. Це створює наукову та практичну прогалину, яка ускладнює впровадження енергоефективних технологій у реальні будівельні проекти [1, 14, 15].

Таким чином, означена стаття присвячена вирішенню завдання розроблення системно інтегрованої організаційно-технологічної моделі оптимізації енергоефективного будівництва, побудові алгоритму її функціонування та визначенню критеріїв, що забезпечують комплексну оцінку ефективності. У роботі робиться спроба поєднати технологічні, енергетичні та організаційні аспекти у єдиній системі, що дозволяє суттєво підвищити точність розрахунків, покращити якість управління процесами та забезпечити науково обґрунтовані підходи до проектування і реалізації енергоефективних будівельних технологій. Таким чином, стаття спрямована на заповнення прогалин у сучасній науковій літературі й розробка нових підходів до оптимізації будівельних процесів, що відповідають актуальним потребам галузі [16, 17].

Мета. Метою статті є розроблення та обґрунтування системно інтегрованої організаційно-технологічної моделі оптимізації енергоефективного будівництва, здатної забезпечити раціональне використання ресурсів, підвищення технологічної надійності та зниження енергоспоживання на всіх етапах реалізації будівельних процесів. Для досягнення цієї мети у статті ставляться такі завдання:

- визначити системні взаємозв'язки між організаційними, технологічними та енергетичними параметрами будівельного виробництва;
- сформулювати критерії, показники та параметри ефективності моделі;
- розробити алгоритм функціонування системи, що передбачає багатокритеріальну оцінку та вибір оптимальних технологічних рішень;

Основна частина. У сучасних умовах підвищення енергетичної вартості ресурсів та зростання екологічних вимог принципово важливо впроваджувати у будівельній галузі системно-інтегровані організаційно-технологічні моделі (СІ-ОТМ) енергоефективного будівництва (рис. 1). Метою таких моделей стає не лише проектування енергоощадних будівель, але й оптимізація технологічної по-

слідовності виконання робіт та логістики будівельного процесу, що безпосередньо впливає на мінімізацію енерговитрат протягом життєвого циклу об'єкта. В рамках даного дослідження обґрунтовується, що саме інтеграція організаційних і технологічних підсистем із врахуванням логістичних потоків дозволяє реалізувати комплекс заходів з енергоефективності, які відповідають вимогам чинних нормативів [18].

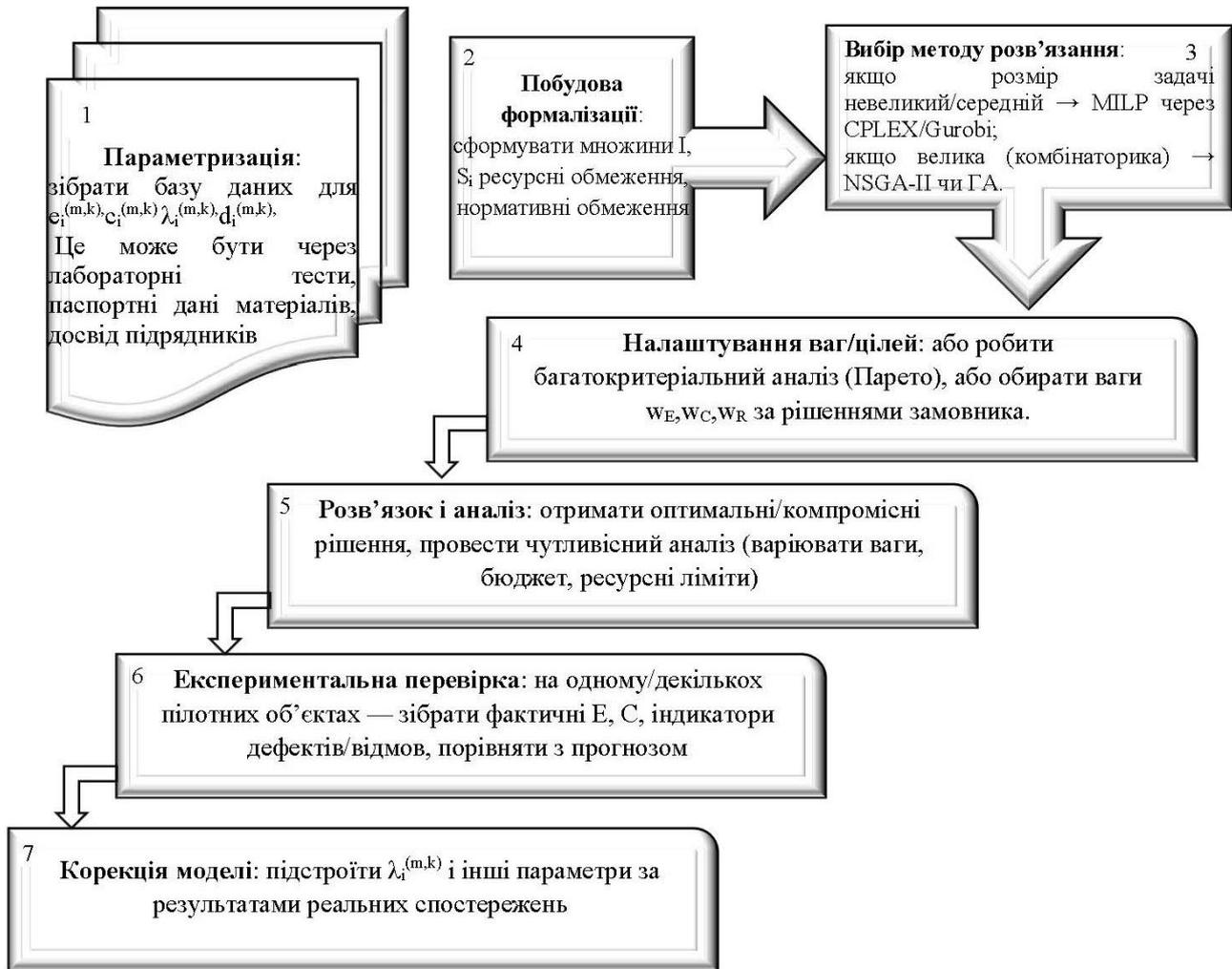


Рис. 1. CIOTM енергоефективного будівництва – взаємодія трьох базових компонентів

CIOTM енергоефективного будівництва передбачає взаємодію трьох базових компонентів: організаційної підсистеми (управління процесом, координація учасників, логістика ресурсів), технологічної підсистеми (будівельні технології, монтажні роботи, використання матеріалів та обладнання) і підсистеми контролю/моніторингу (вимірювання енергоспоживання, системи автоматизації, аналіз ефективності).

У логіко-системному розрізі формулюється послідовність: планування → логістика → технологія → моніторинг → коригування. Для будівельних проєктів це означає, що ще на етапі передпроектного планування слід формувати логістичні маршрути доставки матеріалів, розміщення мобільних засобів, установа

інженерних систем із урахуванням мінімізації втрат (енергії, часу, матеріалів). Далі технологічний ланцюг виконується так, щоб забезпечити термічну цілісність оболонки, високий енергоефективний клас інженерних систем та гарантувати реалізацію показників питомого енергоспоживання, що визначаються чинними нормативами.

Технологічна послідовність будівництва – це сукупність взаємопов'язаних етапів: підготовчі роботи → штукатурно-монтажні роботи → інженерні системи → зовнішня теплоізоляція → внутрішні оздоблювальні роботи.

У рамках СІОТМ кожен з цих етапів може бути оптимізований за такими напрямками:

✓ Паралелізація та комплектування ресурсів. Зменшення часу очікування – зниження енерговитрат, пов'язаних із тимчасовими технологічними режимами (напр., тимчасове опалення, освітлення простору).

✓ Реалізація “холодного ланцюга” монтажу огорожувальних конструкцій. Монтаж теплоізоляційної оболонки слід здійснювати як найраніше після зведення несучих конструкцій, у поєднанні з герметизацією огорожувальних елементів. Це дозволяє уникнути втрат тепла (на етапах тимчасового опалення) і скоротити витрати на енергообігрів приміщень у “виконаному” стані. Вимоги до опору теплопередачі R_{qmin} згідно з [19, 14] повинні бути виконані та відповідати нормам чинного законодавства [20].

✓ Упровадження компоновки інженерних систем на ранніх етапах монтажу. Інженерні системи опалення, вентиляції, кондиціонування мають бути проєктовані з урахуванням енергоефективності, автоматизації та моніторингу, як це передбачено чинними нормативними документами [21]. З точки зору технологічної послідовності це означає: прокладка трубопроводів, монтаж обладнання, автоматика та системи вимірювання повинні бути інтегровані у монтажну послідовність таким чином, щоб уникнути повторних демонтажів чи коригувань, які ведуть до додаткових витрат енергії і матеріалів [22, 23].

✓ Стандартизація та модульність. Використання модульних енергоефективних блоків, попередньо виготовлених елементів – це зменшення монтажного часу, зниження енергії, витраченої на тимчасові системи підтримки умов (опалення-освітлення) і скорочення логістичних перевезень. У межах СІОТМ така технологічна стратегія передбачає впровадження збірних конструкцій, які спрощують логістику та монтаж.

Інтеграція цифрових технологій (енергомодельовання) у розробку моделі (рис. 2):

1. Розрахунок вартості технології:

Розрахунок вартості – це перший етап оцінки технології, під час якого визначається, скільки коштує виконати певний обсяг робіт V (наприклад 1 м^3 бетону або 1 м^2 стіни) за вибраною технологією. У процесі враховуються дві основні складові: вартість матеріалів та вартість ресурсів.

1.1 Вартість матеріалів

Для кожного матеріалу, який використовується в технології, відома його ціна за одиницю $UnitCost[m_i]$ та норма витрати на одну одиницю робіт q_{mi} . Тоді вартість матеріалів для всього обсягу робіт V обчислюється за формулою:

$$C_{mat}(V) = (UnitCost[m_i] \times q_{mi} \times V) \quad (1)$$

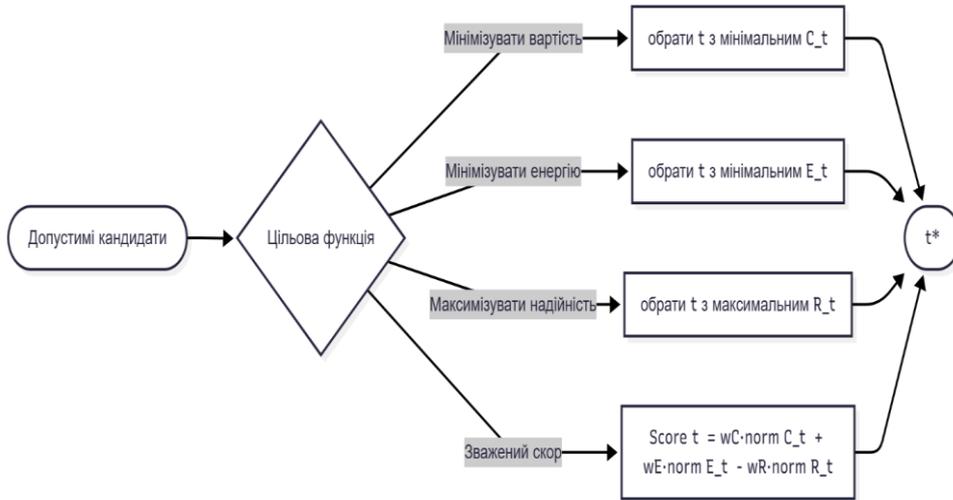


Рис. 2. Вибір “кращої” технології серед допустимих

1.2. Вартість ресурсів

Ресурси – це робоча сила, техніка або машини. Для кожного ресурсу відома ставка оплати $RateCost[r_j]$ і норма використання q_{rj} (наприклад, годин на 1 одиницю робіт). Вартість ресурсів визначається як:

$$C_{res}(V) = (RateCost[r_j] \times q_{rj} \times V) \quad (2)$$

1.3. Загальна вартість технології

Після підсумування матеріальних і ресурсних витрат отримуємо повну вартість виконання обсягу робіт V за даною технологією:

$$C_{tech}(V) = C_{mat}(V) + C_{res}(V) \quad (3)$$

2. Розрахунок надійності технології

Розрахунок надійності показує, яка ймовірність того, що технологічна система працюватиме без відмови протягом заданого часу (t , років). Надійність залежить від характеристик матеріалів, умов експлуатації та параметрів самої технології.

2.1. Основна ідея

Кожен матеріал має інтенсивність відмов λ_m , коефіцієнт запасу міцності S_m , а технологія має свої коефіцієнти: k_{env} – вплив середовища, k_{rel} – коефіцієнт надійності.

2.2. Коригування інтенсивності відмов

$$\lambda_{adj} = \lambda_m \times (k_{env} / (k_{rel} \times S_m)) \quad (4)$$

2.3. Сумарна інтенсивність відмов технології

$$\Lambda_{eq} = \lambda_{adj} \quad (5)$$

2.4. Ймовірність безвідмовної роботи

$$R_{tech}(t) = \exp(-\Lambda_{eq} \times t) \quad (6)$$

де t – період експлуатації (роки), а $R_{tech}(t)$ – ймовірність того, що технологія не вийде з ладу протягом t років.

2.5. Інтерпретація

- Якщо $R_{tech}(t)$ близьке до 1 – технологія дуже надійна.
- Якщо $R_{tech}(t)$ менше 0.8 – потрібно переглянути матеріали або умови.
- Зростання коефіцієнта запасу міцності або зменшення λ_m підвищує надійність.
- Велике k_{env} (агресивне середовище) знижує надійність.

2.6. Алгоритм обчислення

2.6.1. Взяти усі матеріали з технології.

2.6.2. Для кожного знайти λ_m , S_m , k_{env} , k_{rel} .

2.6.3. Обчислити λ_{adj} для кожного матеріалу.

2.6.4. Просумувати \rightarrow отримати Λ_{eq} .

2.6.5. Підставити у формулу $R_{tech}(t) = \exp(-\Lambda_{eq} \times t)$.

2.6.6. Отримати значення надійності технології.

3. Розрахунок енерговитрат технології

Розрахунок енерговитрат дозволяє визначити, скільки електроенергії споживає технологічний процес під час виконання певного обсягу робіт V за період тривалості H (годин). У розрахунок входять три основні складові: енергія процесу, енергія чергового режиму та енергія ресурсів.

3.1. Енергія процесу

Це основна енергія, яка безпосередньо витрачається на виконання технологічних операцій. Вона пропорційна обсягу робіт V і питомій енергії E_{unit} (кВт·год на одиницю обсягу):

$$E_{proc} = E_{unit} \times V \quad (7)$$

3.2. Енергія чергового режиму

Черговий або допоміжний режим характеризує постійне споживання енергії під час роботи обладнання, нагрівання систем, очікування чи підтримання умов процесу. Ця складова залежить від середньої потужності у черговому режимі $P_{standby}$ (кВт) і тривалості процесу H (годин):

$$E_{standby} = P_{standby} \times H \quad (8)$$

3.3. Енергія ресурсів

Додаткову енергію споживають ресурси – наприклад, машини, інструменти чи механізми. Для кожного ресурсу відома його потужність або ефективність P_{r_j} (кВт або кВт·год на одиницю). Загальна енергія ресурсів для обсягу робіт V розраховується як:

$$E_{res} = P_{r_j} \times V \quad (9)$$

3.4. Повна енергія технології

Сумарна енерговитрата технології складається з усіх трьох складових і визначається формулою:

$$E_{tech}(V, H) = E_{proc} + E_{standby} + E_{res} \quad (10)$$

3.5. Інтерпретація результату

Отримане значення $E_{tech}(V, H)$ показує повне енергоспоживання вибраної технології для заданого обсягу робіт V і тривалості H . Цей показник використовується для порівняння технологій за енергоефективністю та впливом на довкілля.

4. Загальна оцінка технології

Загальна оцінка технології дозволяє комплексно порівняти кілька технологічних варіантів з урахуванням їхньої вартості, енерговитрат та надійності. Для цього використовується інтегральна (зважена) формула, яка враховує вплив кожного з трьох критеріїв.

4.1. Основні параметри

Для кожної технології t визначаються такі параметри:

- C_t – повна вартість технології (грн)
- E_t – повні енерговитрати (кВт·год)
- R_t – надійність технології (ймовірність безвідмовної роботи)

4.2. Нормалізація показників

Оскільки вартість, енергія та надійність мають різні одиниці вимірювання, їх необхідно привести до безрозмірного вигляду за допомогою нормалізації. Для цього використовуються мінімальні та максимальні значення серед усіх технологій:

$$\begin{aligned} C_{norm} &= (C_t - C_{min}) / (C_{max} - C_{min}) \\ E_{norm} &= (E_t - E_{min}) / (E_{max} - E_{min}) \\ R_{norm} &= (R_t - R_{min}) / (R_{max} - R_{min}) \end{aligned} \quad (11)$$

Після нормалізації всі показники матимуть значення в діапазоні від 0 до 1, де 0 – найкраще значення, а 1 – найгірше.

4.3. Зважена оцінка технології

Інтегральна оцінка визначається як зважена сума нормалізованих показників з урахуванням вагових коефіцієнтів w_C , w_E та w_R , які задаються користувачем:

$$Score_t = w_C \times C_{norm} + w_E \times E_{norm} - w_R \times R_{norm} \quad (12)$$

де:

- w_C – вага критерію вартості
- w_E – вага критерію енерговитрат
- w_R – вага критерію надійності (віднімається, бо більша надійність – це краще)

Чим менше значення $Score_t$, тим кращою вважається технологія.

4. Інтерпретація результатів

Отримане значення $Score_i$ дозволяє порівнювати різні технології між собою. Вибирається технологія з найменшим значенням $Score_i$. Якщо необхідно надати пріоритет енергоефективності, можна збільшити вагу w_E ; якщо важлива надійність – підвищити w_R .

5. Підсумкова рекомендація

Після розрахунку оцінки для всіх доступних технологій формується рейтинг, де перше місце займає технологія з найнижчим $Score_i$. Цей підхід забезпечує обґрунтований вибір з урахуванням економічних, енергетичних та технічних факторів.

Проведене дослідження у межах інтеграції цифрових технологій у процес формування системно-інтегрованої організаційно-технологічної моделі енергоефективного будівництва є фундаментальним чинником підвищення точності, керованості та наукової обґрунтованості управлінських рішень. Використання методів енергомодельовання, цифрового аналізу даних та алгоритмізації вибору технологічних рішень забезпечує комплексне оцінювання параметрів вартості, енерговитрат і надійності будівельних технологій.

Висновки. Розроблена методика дозволяє на основі цифрових даних обчислювати три базові групи показників — економічну, енергетичну та експлуатаційну, що в сукупності формують інтегральну характеристику технологічного процесу. Зокрема, обчислення повної вартості технології (C_{tech}), питомої енерговитрати (E_{tech}) та показника надійності ($R_{tech}(t)$) створює можливість не лише порівнювати технологічні альтернативи, а й здійснювати обґрунтований вибір оптимального варіанта на основі зваженої багатокритеріальної оцінки ($Score_i$).

Впровадження цифрових алгоритмів нормалізації та вагового коригування критеріїв дозволило уніфікувати процес прийняття рішень незалежно від масштабів будівельного об'єкта, виду технології чи зовнішніх умов. Завдяки цьому система набуває властивостей адаптивності та самонавчання, що забезпечує можливість оновлення параметрів за результатами фактичної експлуатації. Таким чином, модель здатна не лише прогнозувати, а й постійно уточнювати свої показники, наближаючись до реальних енергетичних характеристик об'єкта.

Окрему увагу приділено створенню цифрового контуру управління енергоефективністю, який інтегрує бази даних матеріалів, показники споживання енергії, параметри надійності та витрат у єдиному інформаційному середовищі.

Перелік посилань

1. Арутюнян, І. А., Жамілов, О. Д., & Веремій, Г. (2023). Енергоефективна політика в цивільному будівництві: можливості та перспективи застосування. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 23, 17–27. <https://doi.org/10.15802/bttrp2023/281075>
2. Starczyk-Kołbyk, A., & Jędras, I. (2025). Integrated Risk Assessment in Construction Contracts: Comparative Evaluation of Risk Matrix and Monte Carlo Simulation on a High-Rise Office Building Project. *Applied Sciences*, 15(17), 9371. <https://doi.org/10.3390/app15179371>
3. Anin, V. I., & Ichetovkin, A. O. (2021). Mechanism for choosing organizational and technological solutions based on integrated management of the construction process. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, 2(93), 7–14. <https://doi.org/10.30838/j.pmhtm.2413.270421.7.736>

4. Ryzhakov, D., Vakolyuk, A., Fedorova, Y., Revunov, O., & Gizhko, A. (2020). Determining the features of system-forming factors of value-oriented management in construction projects. *Management of Development of Complex Systems*, (43), 182–191. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.182-191>
5. Білов, Ю. О., Анін, В. І., & Ажажа, О. В. (2025). Застосування сучасних іт-технологій у будівельній індустрії. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, (27), 20–27. <https://doi.org/10.15802/bttrp2025/331600>
6. Анін, В. І., & Новикова, І. В. (2016). Методичні засади управління ризиками на будівельних підприємствах України в сучасних умовах. *Економіка. Менеджмент. Бізнес*, 1(15), 41–47.
7. Заяць, Є.І. (2015). Розвиток методів оцінки, обґрунтування та вибору раціональних організаційно-технологічних рішень зведення висотних багатофункціональних комплексів. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, 6(207), 37–44.
8. Ісаєнко, Д.В., Плоский, В.О., & Теренчук, С.А. (2018). Формування нечіткої бази знань системи підтримки прийняття рішень з технічного регулювання будівельної діяльності. *Управління розвитком складних систем*, 35, 168–174.
9. Арутюнян, І.А. (2020). *Науково-теоретична платформа активізації та розвитку будівництва України: монографія*. ЗНУ.
10. Li, R., Shari, Z., & Ab Kadir, M. Z. A. (2025). A review on multi-objective optimization of building performance – Insights from bibliometric analysis. *Heliyon*, 11(4), e42480. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42480>
11. Yang, Y., Lu, F., & Qing, L. (2024). Multiobjective Optimization Method for Energy-Saving Design of Green Buildings. *Advances in Civil Engineering*, 2024(1). Portico. <https://doi.org/10.1155/2024/9776633>
12. Zhang, Z., Yao, J., & Zheng, R. (2024). Multi-Objective Optimization of Building Energy Saving Based on the Randomness of Energy-Related Occupant Behavior. *Sustainability*, 16(5), 1935. <https://doi.org/10.3390/su16051935>
13. Alpar, S., Berger, J., Mazuroski, W., & Belarbi, R. (2024). Shape optimization of the energy efficiency of building retrofitted facade. *Solar Energy*, 271, 112437. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112437>
14. ДСТУ EN ISO 52000-1:2023 *Енергоефективність будівель. Комплексне оцінювання енергоефективності будівель*. Частина 1. Загальна структура та методики (EN ISO 52000-1:2017, IDT; ISO 52000-1:2017, IDT). 92 с.
15. Куліков, П.М. (2015). *Енергоефективність в будівництві та архітектурі Випуск 7*.
16. Пастухова, С. В., Арутюнян, І. А., Ажажа, М. А. (2025). Удосконалення організаційно-технологічних рішень з урахуванням принципів енергоефективності та сталого розвитку в цивільному будівництві. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*, 55, 189–198. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55\(2\).189-198](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(2).189-198).
17. Urenev, V., & Bakhtin, D. (2020). Experience in designing energy-efficient public buildings of state ownership in Ukraine. *Current Problems of Architecture and Urban Planning*, (57), 322–339. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.57.322-339>
18. Kosenko, L., Koval, O., Yurchenko, E., & Koval, A. (2023). Analysis of European regulatory requirements for near to zero energy consumption buildings and the possibility of implementation in Ukraine. *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*, 47, 28–35. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.47.28-35>
19. ДБН В.2.6-31:2021 *Теплова ізоляція та енергоефективність будівель*. Чинний від 2022-09-01]. Вид. офіц. (2022). Київ : Мінрегіонрозвитку України
20. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» від 08.06.2017 № 2118-VIII. (2017). *Відомості Верховної Ради України*, 33, 359. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>

21. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 27.10.2020 № 260 (2021). *Офіційний вісник України*, 1, 408. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20#Text>
22. Kovalchuk, N., & Shcherbakova, I. (2024). Modern technological solutions for the construction of energy-efficient buildings. *E3S Web of Conferences*, 531, 01022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453101022>
23. Matiushenko, S. Yu., & Sokolov, I. A. (2025). Optimization of organizational and technological solutions for the construction of buildings with regard to minimization of energy consumption. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 3(027), 111–121. <https://doi.org/10.30838/ujcea.2312.270425.111.1167>

ABSTRACT

Purpose. The study aims to determine the efficiency parameters of a system-integrated organizational and technological model of energy-efficient construction through the identification of optimal technological solutions, focusing on the interaction of organizational, technological, and energy processes and the criteria that define adaptability, technological stability, and overall energy efficiency.

Methodology. The assessment is based on an integrated analysis of model parameters using multi-criteria optimization, systems analysis, mathematical modeling, and algorithmic tools for energy-efficient process management. The proposed methodology combines principles of energy saving, resource optimization, and technological reliability, enabling a comprehensive evaluation of the model's performance and operational behavior.

Results. The obtained indicators reflect the model's efficiency, the degree of technological integration, and the level of energy consumption optimization within construction processes. The quantitative system of parameters allows for an objective evaluation of the organizational-technological model and supports the identification of pathways for enhancing energy performance.

Scientific novelty. The research establishes correlations between the model's structure, its energy parameters, and the applied optimization algorithms, contributing to the formalization of system-integrated approaches in construction. The findings extend existing scientific concepts related to the design of energy-efficient buildings and form a basis for further investigation of integrated organizational-technological systems.

Practical significance. The results may be applied to improve construction management, develop energy-efficient technological schemes, design resource-saving systems, and implement automated algorithmic solutions. Their practical use contributes to increasing the efficiency and sustainability of modern building systems and supports the rational use of energy resources.

Keywords: *system-integrated model, optimization, energy-efficient construction, algorithm, technological solutions, efficiency criteria, organizational and technological systems.*

дата першого надходження статті до видання	03.10.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	07.11.2025
дата публікації (оприлюднення)	29.12.2025