АЛГОРИТМІЗАЦІЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БУДІВЕЛЬНОЇ ТЕХНІКИ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Ігор Онофрійчук, аспірант кафедри економіки будівництва[1] (ORCID: 0000-0002-2363-4896),
Андрій Росинський, доцент, доктор філософії, доцент кафедри економіки будівництва[1] (ORCID: 0000-0003-4119-7463),
[1]Київський національний університет будівництва і архітектури, проспект Повітряних Сил, 31, 03037, м. Київ, Україна

АНОТАЦІЯ. *У роботі обґрунтовано об'єктивну необхідність інтеграції алгоритмічного інструментарію в системи підтримки прийняття управлінських рішень будівельних підприємств. Доведено, що на тлі переходу галузі до енергоощадних технологій та жорсткого регулювання ресурсного ціноутворення, застосування класичних детермінованих моделей фінансового планування втрачає свою релевантність. Запропоновано інноваційний організаційно-економічний підхід, що базується на апараті теорії нечітких множин, зокрема нечітких числах 2-го типу. Використання цього апарату дозволяє адекватно абсорбувати виробничу стохастичність та хеджувати ризики відхилень фактичних експлуатаційних витрат від кошторисних нормативів. Формалізовано предиктивний алгоритм, який виявляє асиметрію витратомісткості окремих видів енергоощадної техніки. Імплементація розроблених моделей створює наукове підґрунтя для оптимізації бюджетування та формування беззбиткових тендерних пропозицій.*

Ключові слова: *економіка будівництва; енергоменеджмент; виробнича стохастичність; нечіткі множини; загальновиробничі витрати; ціноутворення; предиктивний аналіз; ризик-менеджмент.*

Вступ. Динаміка сучасного поступу будівельного сектору детермінується магістральним макроекономічним вектором на впровадження енергоощадних засобів механізації. Даний тренд обумовлений не стільки екологічним порядком денним, скільки жорстким тиском фінансових чинників. У подібних реаліях для вітчизняних підрядних організацій менеджмент енергоефективності остаточно виходить за межі суто репутаційних декларацій. Він трансформується у фундаментальний важіль забезпечення фінансової стійкості та стає безальтернативним контуром контролю за операційними видатками в умовах агресивної ринкової конкуренції.

Особливої гостроти ця проблематика набуває в контексті масштабної післявоєнної відбудови цивільної та промислової інфраструктури України. Оскільки левова частка фінансування таких будівельних проєктів здійснюється за рахунок державних коштів або грантів міжнародних фінансових інституцій, вона підлягає суворому контролю із застосуванням ресурсного методу ціноутворення. Відповідно, будь-яке економічне обґрунтування застосування енергоощадної техніки вимагає фундаментальної аналітики чинних кошторисних нормативів та жорсткого дотримання лімітів витрачання ресурсів.

Найбільш ресурсоємною ланкою на будівельному майданчику є механізоване вертикальне переміщення вантажів. Підйомні крани генерують найвагоміший відсоток енергоспоживання об'єкта будівництва і, таким чином, формують значну частку прямих і накладних витрат у собівартості будівельно-монтажних робіт. Техніко-економічне обґрунтування вибору альтернативних типів засобів механізації – наприклад, баштових електрокранів чи дизельних гусеничних аналогів – відбувається у площині виробничої стохастичності. Тому детерміновані моделі планування втрачають свою прогностичну здатність через високу волатильність цін на енергоносії, зокрема комерційних тарифів на електроенергію, та кадровий дефіцит. Описана кон'юнктура ринку обґрунтовує необхідність формування адаптивного інструментарію управління вартістю експлуатації будівельних машин, здатного адекватно враховувати фактори ризику під час реалізації будівельних проєктів.

Аналіз літературних джерел. Економічні аспекти впровадження енергоощадних технологій у будівництві достатньо широко висвітлені у фаховій науковій літературі. Проте більшість дослідників традиційно фокусується на макроекономічній ефективності проєктів та інвестиційній

привабливості «зеленого» будівництва для кінцевого споживача [1]. Зокрема у праці [2] ґрунтовно досліджуються організаційні засади управління життєвим циклом об'єктів нерухомості.

Водночас у попередніх дослідженнях авторів [3, 4] було доведено визначальну роль оперативного контролю енергоспоживання як безпосереднього каталізатора розвитку економічного потенціалу девелоперської компанії. Попри це, прикладні механізми мікроекономічного контролю витрат під час щоденної експлуатації важкої будівельної техніки залишаються недослідженими. Наявний розрив між теоретичними концепціями «зеленого» будівництва та суворою практикою формування грошових потоків підрядної організації потребує вирішення із залученням інноваційного математичного апарату «м'яких обчислень», що дозволить формалізувати нечітку економічну інформацію.

Мета роботи. Розроблення організаційно-економічного алгоритму предиктивного оцінювання енергоефективності експлуатації будівельних машин із застосуванням математичного апарату теорії нечітких множин для оптимізації системи загальновиробничих витрат та підвищення рентабельності будівельного підприємства.

Виклад основного матеріалу. Економічна природа енергоефективності у будівельному виробництві характеризується вираженим дуальним характером. З інженерно-технічного боку, сучасні енергоощадні машини проєктуються для максимальної мінімізації фізичного споживання ресурсів на одиницю роботи (зниження витрат кіловат-годин або літрів палива). Однак з позиції економіки підрядного підприємства, релевантні індикатори фінансової ефективності категорично не можуть обмежуватися лише прямою матеріальною складовою.

Згідно з чинною Настановою з визначення вартості будівництва [5], економічна модель експлуатації машин є значно ширшою. Кожна відпрацьована машино-година підйомної техніки безальтернативно генерує залучення значних супутніх загальновиробничих витрат (ЗВВ). Особливу увагу тут привертає ІІІ блок ЗВВ, що формується підрядником для організації будівельного виробництва. Ці накладні витрати розраховуються як показник, пропорційний до нормативно-розрахункової трудомісткості [5, 6], і включають широкий спектр фінансових зобов'язань.

У цьому контексті нами ідентифіковано нетипову диспропорцію витратомісткості у будівництві. Імплементація складної, теоретично більш економної машини (наприклад, потужного козлового або баштового електрокрана) здатна призвести до такого стрімкого зростання зарплато-місткості процесів обслуговування (через потребу у залученні висококваліфікованих наладчиків електроніки, сертифікованих електриків вищих розрядів та фахівців з охорони праці та техніки безпеки), що загальна економічна ефективність процесу деградує. Уся фінансова економія, отримана за статтею «Матеріальні ресурси» (енергоносії), повністю нівелюється та перекривається мультиплікативним зростанням витрат за статтею «Оплата праці» та відповідним штучним масштабуванням загальновиробничих витрат.

Для математичного опису та прогнозування цього складного економічного зв'язку пропонується застосовувати нелінійну двофакторну мультиплікативну економетричну модель. Вона дозволяє економістам знаходити точку рівноваги між цільовою вантажопідйомністю крана та сукупними грошовими витратами підприємства на енергоресурси й організацію праці. Проте з огляду на турбулентність та стохастичність сучасного економічного середовища, використання жорстких точкових оцінок, отриманих класичними методами математичної статистики, є нерепрезентативним.

Відхилення від планової калькуляції виникають на об'єкті щоденно: через вимушені простої техніки під час повітряних тривог або відключень мережі, через динамічну зміну тарифних розрядів робітників або непередбачувані логістичні збої у постачанні палива. Класичний апарат нормального розподілу (статистика Гауса) під час економічного моделювання будівництва демонструє низьку релевантність, оскільки кожен інвестиційний проєкт відзначається унікальністю параметрів середовища. Саме тому для діджиталізації системи фінансового енергоменеджменту [3] нами розроблено багатокритеріальний алгоритм на основі нечітких множин 2-го типу, здатних ефективно абсорбувати слід невизначеності будівельного процесу.

Організаційно-економічний алгоритм предиктивного управління витратами охоплює чотири взаємопов'язані етапи:

1) *Агрегація первинної фінансової бази*. Планово-економічний відділ за допомогою ERP-системи підприємства фіксує вторинні показники енергомісткості (питомі витрати енергоносіїв на 1 машино-годину) та розраховує фактичний зарплато-коефіцієнт (добуток реальних трудовитрат на тарифну ставку відповідного кваліфікаційного розряду ланки робітників).

2) *Розрахунок економічного індексу масштабу.* Обчислюється відносний безрозмірний індикатор – коефіцієнт гальмування (або прискорення) витрат. Цей показник демонструє безпосередню економічну реакцію операційного бюджету проєкту на інтенсифікацію потужності залученої техніки.

3) *Фаззифікація фінансового результату.* Оцінка допустимості економічних відхилень фактичних витрат від жорстких кошторисних лімітів здійснюється через дзвоноподібну функцію належності:

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - c}{\sigma} \right)^{2b}}, \tag{1}$$

де $\mu_A(x)$ – міра прийняття ефективності фінансового енергоменеджменту (набуває значень від 0 до 1, де 1 – ідеальна відповідність еталону);

x – фактичний економічний коефіцієнт зміни сукупних витрат на конкретному об'єкті;

c – мода нечіткого числа (еталонний нормативний показник для даного типу техніки);

σ – параметр розтягнення нечіткої множини (довірчий коридор коливань фінансового бюджету);

b – параметр крутизни (індикатор чутливості підрядного підприємства до фінансових ризиків та можливих бюджетних девіацій).

4) *Параметризація за Парето та прийняття рішень.* Головною методологічною перевагою запропонованого алгоритму є інноваційний спосіб визначення параметра σ. Замість класичних статистичних похибок використано економічний закон Парето (правило 20/80) та концепцію ABC-аналізу витрат [6]. Фінансовий коридор коливань розмежовується на дві зони: «внутрішнє розтягнення» (відповідає топ-20% найбільш оптимістичних та економних сценаріїв експлуатації техніки) та «зовнішнє розтягнення» (охоплює межу у 33% спостережень, що виступає критичною лінією беззбитковості для підрядника).

Практична управлінська цінність розробленого алгоритму полягає у його здатності генерувати випереджувальні стратегічні рішення. Якщо фахівець з ціноутворення фіксує, що розрахований показник μ опускається нижче критичної межі «зовнішнього розтягнення», це є чітким економічним маркером повної втрати фінансового контролю над об'єктом.

Як доводять розрахунки [6], при необґрунтованому залученні надпотужних електрокранів інтенсифікація їх роботи зумовлює експоненціальне зростання трудовитрат обслуговуючої ланки (прискорення в 1,72 рази), що деструктивно збільшує загальновиробничі витрати компанії та виводить об'єкт у зону збитковості. У такій ситуації інструментарій сигналізує, що економічно доцільніше оптимізувати ПВР і застосувати енергоощадні підйомні машини з дизельним приводом. Для останніх діє класичний економічний ефект економії на масштабі (із доведеним коефіцієнтом гальмування зростання витрат палива на рівні 0,573 та супутніх ЗВВ на рівні 0,750), що гарантує збереження маржинального прибутку та фінансову стабільність будівельного контракту.

Висновки. Запропонований організаційно-економічний алгоритм виступає якісним інструментом підтримки прийняття економіко-управлінських рішень у будівельному виробництві. Імплементація математичного апарату нечітких множин 2-го типу та диференційованих інтервалів Парето переводить процес формування кошторисної документації у площину хеджування фінансових ризиків. Це забезпечує врахування деструктивних впливів виробничої стохастичності та зовнішніх чинників, а також уможливлює предиктивну ідентифікацію та нівелювання нетипових диспропорцій витратомісткості експлуатації енергоощадних машин. Впровадження алгоритму дозволяє підряднику запобігти неконтрольованому розширенню загальновиробничих витрат і формувати математично збалансовані та конкурентоспроможні тендерні пропозиції.

Список використаних джерел

1. Vysochanska, M., & Bilotil, V. (2023). Ensuring energy efficiency in buildings as one of the advantages of green building. *Agrosvit*, 15, 29–42. https://doi.org/10.32702/2306-6792.2023.15.29.
2. Kozyk, V. V., Marushchak, U. D., & Marko, O. Y. (2024). Assessment of energy efficiency in the life cycle of residential building objects. *Business Inform*, 5(556), 201–207. https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-5-201-207.
3. Onofriichuk, I., & Rosynskyi, A. (2025). Justification of the components of a digitalized energy consumption control toolkit for contracting enterprises. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 55(1), 259–272. https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.55(1).259-272
4. Rosynskyi, A., & Onofriichuk, I. (2020). Energy efficiency of construction processes as an instrument for economic potential growth of real estate development company. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 44, 31–39. https://doi.org/10.32347/2707-501x.2020.44.31-39
5. Estimated standards of Ukraine. Guideline for determining the cost of construction, Order of the Ministry of Communities and Territories Development of Ukraine No. 281 (2021) (Ukraine).
6. Onofriichuk, I., & Rosynskyi, A. (2026). Justification of energy efficiency indicators in the energy management system of construction production. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 57(2), 323–339. https://doi.org/10.32347/2707-501x.2026.57(2).323-339.