

Ігор ОНОФРІЙЧУК,

аспірант кафедри економіки будівництва

ORCID: 0000-0002-2363-4896

Андрій РОСИНСЬКИЙ,

доктор філософії, доцент

ORCID: 0000-0003-4119-7463

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ОБҐРУНТУВАННЯ СКЛАДОВИХ ЦИФРОВІЗОВАНОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ КОНТРОЛЮ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПІДРЯДНИМИ ПІДПРИЄМСТВАМИ

Стаття присвячена проблемі управління енергоефективністю будівельного виробництва підрядних підприємств, що зумовлена розривами між періодами споживання енергоресурсів та надходженням фінансових потоків для їх оплати. Визначено, що традиційні методи оцінки дефіциту платіжних можливостей не дозволяють дати обґрунтовану відповідь щодо фінансової та енергетичної безпеки будівельних підприємств. Зважаючи на це, у статті запропоновано концептуальні засади проектування інтелектуальних систем контролю енергоспоживання підрядними підприємствами на фоні формування фінансових можливостей розрахунків за здійснені витрати енергоносіїв й електроенергії.

На основі кошторисних норм у будівництві обґрунтовано індикаторні змінні, варіація яких складає підстави для посилення контролю за енергоспоживанням, визначено порогові значення, наближення до яких буде свідченням про доцільність чи недоцільність перегляду політики енергомісткості будівельного виробництва і його організації. Досліджено динаміку ресурсоспоживання у відповідності з обґрунтованими технологічними способами виконання будівельних робіт. Виявлено, що нарощення енергоспоживання не є рівномірним, а залежить від часткових приростів кошторисної вартості матеріалів, будівництва та нормативно-розрахункової трудомісткості.

*Доведено доцільність практичного застосування кількісних значень індикаторів засобами «традиційної» математичної статистики – кластеризації за методом *k*-середніх. Наведено детальну аргументацію на користь застосування методів теорії нечітких множин для управління енергоспоживанням у будівництві, а саме: функцій належності, їх типу, кількості та параметрів; логічних зв'язок і конструкцій, а також способу застосування нечітких логічних висловлювань.*

Результати досліджень, спрямованих на обґрунтування складових цифровізованого інструментарію контролю, зведено у цілісний 5-етапний алгоритм, придатний для використання фахівцями економічних підрозділів або управлінським персоналом, які не мають спеціалізованої освіти із ІТ-проектування. Водночас отримані результати мають значний науково-практичний потенціал для створення систем штучного інтелекту, здатних управляти енергоспоживанням підрядних підприємств на основі нечіткої логіки та машинного навчання.

Ключові слова: *енергоменеджмент будівництва, енергоефективність, діджиталізація, будівельне виробництво, енергозбереження, економічна безпека будівельних підприємств, кластерний аналіз, теорія нечітких множин, управління витратами, контролінг, штучний інтелект, автоматизація управління, кошторисна вартість будівництва, нормативно-розрахункова трудомісткість, економічна ефективність будівництва, організація будівництва, управління ресурсами, матеріальні витрати, ризики, кореляційний аналіз.*

Вступ і постановка проблеми. Нагальність вирішення проблеми управління енергоефективністю будівельного виробництва зумовлена тим, що періоди споживання енергоресурсів, виникнення зобов'язань по розрахунках за них та отримання фінансових можливостей для здійснення оплати розосереджені у часі. Зазвичай вхідні грошові потоки завершують виробничий цикл енергозабезпечення будівництва, натомість вимоги по оплаті отриманих, проте ще не спожитих енергоносіїв досить часто визначають початок відліку чергового кругопотоку енергоспоживання. У фінансовому та проектному менеджменті для вивчення гостроти дефіциту платіжних можливостей бізнесу обчислюють коефіцієнти парної кореляції вхідних та вихідних матеріальних і фінансових потоків. Проте, попри потужні аналітичні можливості, тіснота стохастичного зв'язку між потоками споживання і нагромадження ресурсів не дає змоги обґрунтувати чітке рішення стосовно синхронної підтримки фінансової і енергетичної безпеки будівельного бізнесу. Натомість розмаїття поєднань високих, середніх та низьких значень коефіцієнта кореляції, що можуть бути як додатними так і від'ємними, для різних аспектів матеріально-технічного та грошового забезпечення операційної діяльності тільки посилює сумніви щодо доцільності заходів, спрямованих на економію чи послаблення обмежень у виробничих витратах. Викладені обставини беззаперечно впливають і на обґрунтування господарських рішень та ефективність застосування контролю енергоефективності у будівництві, що зумовлює необхідність розроблення науково обґрунтованого інструментарію енергоменеджменту підприємств.

Аналіз досліджень і публікацій. Проблемі розроблення прикладного інструментарію інформаційної підтримки енергоменеджменту підприємств реального сектору економіки присвячено низку публікацій [1–7]. Однак увагу науковців більшою мірою зосереджено не на будівельних процесах, як у [8, 9], а на результатах будівництва, тобто показниках енергоефективності будівель, споруд, їх конструктивних елементів [10–14]. Втім, останнім часом наукова активність зосереджена навколо проблем запобігання кризовим явищам у фінансовому забезпеченні будівельної діяльності. Чимало наукових розробок із зазначених можуть бути адаптовані саме до енергозабезпечення будівництва, однак при цьому вони вимагають певних методологічних коректувань [15–21].

Отже, і досі залишається **невирішеною частина проблеми** тактичного та операційного управління енергоспоживанням будівельної організації у зв'язку із матеріальними і фінансовими потоками, що виникають в процесі операційної діяльності.

Мета статті, таким чином, полягає у розробленні цифровізованого інструментарію контролю енергоефективності операційної діяльності підприємства.

Методичну основу дослідження склали структурний аналіз – для визначення часткових складових зростання енергоспоживання у будівництві, кластерний аналіз за методом k-середніх, за допомогою якого було обґрунтовані нечіткі терми чинників енерговитрат і можливостей розрахунків за них, а також основні методи нечіткої логіки – операції із нечіткими множинами, на основі яких стало можливим обґрунтувати параметри функцій належності нечітких термів, та формулювання правил нечітких логічних продукції, у яких реалізовано заперечення й диз'юнкцію нечітких множин.

Виклад основного матеріалу. Ефективний контролінг споживання ресурсів полягає у відповідальному, обґрунтованому встановленні, або усуненні лімітів на обсяги використання тої їх частини, що повністю, або частково змінюють свої якісні властивості під час створення кінцевої цінності. Стосовно будівельної діяльності кінцеву цінність можна зіставити із вартістю конструктивних елементів будівель і споруд. Оскільки первинними кошторисними документами, які дають змогу встановити суму коштів, мінімально необхідну для виконання заданого обсягу будівельних робіт, є локальні кошториси, то саме ці джерела інформації слід вважати підставою для розроблення та впровадження заходів із контролінгу енергоефективності будівництва. Чинна система ціноутворення у будівництві ґрунтується на кошторисних нормах і нормативних показниках, а тому виробнича собівартість будівельної продукції, наведена у локальних кошторисах, обчислюється на основі таких фізичних обсягів використовуваних матеріальних і енергетичних ресурсів, які регламентовано кошторисним нормуванням. Іншими словами, за допомогою локальних кошторисів і відомостей ресурсів до них будь-яке підприємство може встановити цільові або індикаторні показники витрачання матеріальних та енергетичних ресурсів, адже кількісні показники кошторисних норм є усередненими за багаторічним досвідом виконання робіт на різноманітних об'єктах, але у кожному конкретному випадку фактичні витрачання можуть бути і дещо меншими. Однак кошторисну вартість за чинними Настановами повсякчасно розраховують саме за нормативними, тобто усередненими потребами в матеріалах і енергоносіях, отже у разі економії виробничих ресурсів, підприємство активізує додатковий резерв прибутковості. Втім, така економія не може бути безмежною, тому що істотних втрат може зазнати якість робіт. Проте, беззаперечно, вирішальне значення має **аналіз** динаміки ресурсоспоживання у відповідності із обґрунтованим у проєкті технологічним способом виконання робіт. Мається на увазі відсотковий приріст енергетичних, а разом із ними матеріальних витрат і споживчої цінності будівельної продукції. По мірі створення конструктивного елементу послідовно укладаються в діло нові будівельні матеріали, вироби та комплекти. Одночасно, або почергово нагромаджуються і обсяги інших видів спожитих ресурсів. Беззаперечно, обидва процеси спрямовані на усталене нагромадження доданої вартості, якою на етапі будівельного виробництва слугує кошторисна вартість конструктивних елементів. Оскільки предметом даного дослідження є розроблення системи контролінгу, то ретельної уваги заслуговує послідовність етапів прискореного та уповільненого зростання понесених підприємством витрат, насамперед енергетичних. Тому зазначимо, що вживання традиційного для економічного планування терміну «коефіцієнт наростання витрат» є некоректним. Адже наразі розглядається не усереднене значення співвідношення витрачених на виробництво матеріальних та енергоресурсів до готової продукції, а поетапні зміни волатильності такого співвідношення. У якості проміжних етапів можна

вважати окремі будівельні роботи, які необхідно здійснювати для отримання на виході виробничого процесу певного конструктивного елементу, або його поліпшеної характеристики. Викладені міркування спонукали нас застосовувати термін «частковий приріст» для енерговитрат, матеріальних витрат і вартості робіт. Оскільки виробниче споживання енергоносіїв, матеріально-технічних ресурсів і вартості готової продукції односпрямовані, вони забезпечують єдину мету: створення чи оновлення елементу нерухомості, цілком закономірними є високі значимі показники парної кореляції часткових приростів ресурсного споживання і вартості продукції. Підтвердженням даного висновку є результати аналітичного дослідження складових кошторисної документації на виконання повного комплексу будівельних робіт на об'єктах капітального ремонту і реконструкції закладів освіти, який здійснювався восени 2024 р. у різних областях України. Для дослідження було обрано 3 показники, що, на нашу думку, обґрунтовують передумови збільшення енергоспоживання під час виконання окремих етапів будівництва та дещо сповільнюють приріст використання енергоносіїв чи електроенергії на інших:

- частковий приріст кошторисної вартості будівельних матеріалів, виробів, комплектів, x_m ;
- частковий приріст кошторисної вартості будівництва, тобто суми прямих та загальновиробничих витрат при виконанні конструктивного елементу, x_k ;
- частковий приріст нормативно-розрахункової трудомісткості, x_m .

Усі три динамічні показники варто розглядати як індикативні, адже вони із різною інтенсивністю впливають на енерговитрати будівельного процесу. Разом із силою впливу, вищеподані динамічні показники відрізняються і рівнем опосередкованості впливу на вартість спожитих енергоносіїв. Кількісні значення усіх трьох часткових приростів ми пропонуємо визначати у вигляді відносного показнику – питомої ваги значення змінної окремого етапу виконання будівельних робіт до загального підсумку цієї змінної по всьому кошторису. Зокрема, для будівельних матеріалів, виробів, комплектів частковим приростом буде розглядатись питома вага використаних будівельних матеріалів під час улаштування підлог до загальної вартості будівельних матеріалів, виробів, комплектів по всьому об'єкту капітального ремонту. Аналогічно слід розглянути й інші етапи, тобто елементи будівельних робіт – оздоблювальні роботи, опорядження прорізів та ін. Якщо ж взяти до уваги частку нормативно-розрахункової трудомісткості на цьому ж етапі капітального ремонту – улаштуванні підлог – у загальних витратах праці робітників-будівельників та робітників-машиністів під час капітального ремонту цього ж об'єкту, одержимо змінну x_m , яку також потрібно обчислити і для інших етапів робіт у складі їх повного комплексу. У якості робіт чи етапів створення цінності будівельної продукції ми рекомендуємо розглядати окремі розділи локальних кошторисів. Втім, частковий приріст кошторисної вартості ресурсу чи продукту можливо аналізувати і в розрізі окремих робіт – позицій локального кошторису, однак для «відкритих» норм, де використовується ресурс «За проектом», уваги заслуговують не лише підсумки вартості робіт, але й кошторисна вартість потрібних для цього будівельних матеріалів, виробів, комплектів. Звичайно, для одного й того ж етапу будівельного виробництва значення часткових приростів ресурсної потреби та створеної вартості можуть помітно відрізнятися, аналіз таких розбіжностей і складає наріжний камінь контролінгових операцій енергоменеджменту.

Несинхронність виникнення енерговитрат, термінів їх оплати та грошових надходжень підприємств у звичайній мові, термінології проектного менеджменту й наукових дослідженнях може відображатись за допомогою лінгвістичних конструкцій типу:

Якщо вартість спожитих матеріальних ресурсів помірно зростає, а кошторисна вартість зростає суттєво, то трудомісткість робіт (а разом і енергоспоживання) зростає несуттєво.

У такому вислові присутня значна суб'єктивність особи, яка його сформулювала, оскільки не існує загальноприйнятих норм, яка міра зростання визнається суттєвою, а яка помірною. Суперечливість поглядів на поняття міри інтенсивності ознак об'єкта, втім, підлягають деякому узгодженню, усередненню. Саме такі термінологічно-обчислювані процедури покладені в основу сучасних систем штучного інтелекту, основу яких складають нейронні мережі і системи нечіткого логічного висновку. Всі зазначені засоби інформаційного забезпечення обґрунтування рішень оперують функціями належності, найчастіше – це аналітичні формули, які на основі заздалегідь відомих чітких кількісних значень змінної дають змогу встановити кількісну міру прийняття того, що ця змінна має певну ознаку. Наприклад, 5%-ва частка будівельної роботи у кошторисній вартості конструктивного елемента може визнаватись і як «суттєва», і як «несуттєва». Проте упевненість щодо кожної характеристики для одних і тих же 5-ти % на одному й тому ж об'єкті не обов'язково може бути однаковою. Сумніви щодо класифікаційної групи того чи іншого елемента, власне, й вдається відобразити графічно та кількісно за допомогою функцій належності. Функції належності та нечіткі терми можуть застосовуватись і по відношенню до невідомих достеменно, а тільки обґрунтованих розрахунками, теоретичних значень, адже відома численна кількість типів функціонального зв'язку міри належності – числа від 0 до 1 – із чітким значенням змінної. Перехід від чітких значень до характеристик за допомогою нечітких термів – множин, кожен елемент яких, окрім чіткого значення, характеризується ще й мірою прийняття, відомий як фазифікація. Він застосовується для вхідної інформації. Для обґрунтування чіткого значення вихідних, запланованих, прогнозованих, цільових показників із набору їх можливих значень з урахуванням міри прийняття також може обґрунтовано обиратись тільки одне чітке значення. Даний процес також передбачає виконання логічно-обчислювальних процедур із функціями належності, його назва – дефазифікація.

Суб'єктивність оцінок енерговитрат та їх передумов вдається дещо нейтралізувати саме завдяки застосуванню функцій належності в аналітичних обґрунтуваннях. При цьому критично важливо визначити параметри функцій належності на основі емпіричних даних про будівельну діяльність. Подальшим кроком виявляється безпосереднє формулювання аналітичного вигляду функцій належності та вироблення способу їх використання. Численні дослідження економічних процесів будівельних та інших підприємств [15–21] довели доцільність виконання кластерного аналізу для обґрунтування ключових характеристик окремих типологічних груп, за якими, власне, і визначаються аналітичні формули функцій належності. Кластерний аналіз основних етапів будівельних робіт, присутніх у досліджуваній вибірці, було здійснено в розрізі кожної із складових формування енерговитрат будівельного виробництва. Його результати представлені у табл. 1. У цій же таблиці наведено і показники

статистичної значимості кластерних розподілів, і подано аналітичний вигляд функцій належності.

Таблиця 1

**Результати кластерного аналізу динаміки формування вартості
будівельної продукції**

Назва кластеру	Середній рівень по кластеру, $\bar{x}_i=c$	Стандартна помилка по кластеру, $\sigma_{x_i}=a$	Розмір кластеру	Дзвоноподібна функція належності, міра прийняття
1	2	3	4	5
Змінна «Частковий приріст кошторисної вартості будівництва», x_{κ}, F_{κ} розбиття = 196.5157				
несуттєве зростання	0.025	0.017	187	$\mu_{\kappa}^1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{\kappa}-0.025}{0.017}\right)^{2 \cdot 2}}$
помірне зростання	0.140	0.045	66	$\mu_{\kappa}^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{\kappa}-0.140}{0.045}\right)^{2 \cdot 2}}$
суттєве зростання	0.424	0.122	15	$\mu_{\kappa}^3 = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{\kappa}-0.424}{0.122}\right)^{2 \cdot 2}}$
Змінна «Частковий приріст кошторисної вартості будівельних матеріалів, виробів, комплектів», x_{μ}, F_{μ} розбиття = 207.6501				
несуттєве зростання	0.029	0.025	207	$\mu_{\mu}^1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{\mu}-0.029}{0.025}\right)^{2 \cdot 2}}$
помірне зростання	0.181	0.053	46	$\mu_{\mu}^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{\mu}-0.181}{0.053}\right)^{2 \cdot 2}}$
суттєве зростання	0.393	0.075	15	$\mu_{\mu}^3 = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{\mu}-0.393}{0.075}\right)^{2 \cdot 2}}$
Змінна «Частковий приріст нормативно-розрахункової трудомісткості», x_{τ}, F_{τ} розбиття = 257.1232				
несуттєве зростання	0.024	0.022	207	$\mu_{\tau}^1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{\tau}-0.024}{0.022}\right)^{2 \cdot 2}}$
помірне зростання	0.191	0.058	21	$\mu_{\tau}^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{\tau}-0.191}{0.058}\right)^{2 \cdot 2}}$
суттєве зростання	0.584	0.146	12	$\mu_{\tau}^3 = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{\tau}-0.584}{0.146}\right)^{2 \cdot 2}}$

Розроблено авторами

Як видно з табл. 1, результати усіх трьох досліджень, спрямованих на утворення типологічних груп будівельних процесів за силою впливу на енергоспоживання, характеризуються високою статистичною значимістю, оскільки F-критерій розподілів перевищує критичний поріг за імовірності помилки, значно нижчої, аніж 5%. Тобто розподіли не є випадковими, а подібні статистичні характеристики часток трудовитрат, матеріальних затрат і кошторисної вартості буде отримано і для інших вибірок про виконання будівельних робіт на інших подібних об'єктах. По кожному із критеріїв класифікації було здійснено розподіл на 3 групи, відповідно із високим, середнім та низьким рівнем прояву ознак. Втім, для подальшого використання результатів класифікації для прийняття управлінських рішень, кожному із кластерів було поставлено у відповідність три нечітких терми: «несуттєве зростання» для низького прояву ознаки; «суттєве зростання» для високих значень структурних часток та «помірне зростання» – для кластерних груп, що об'єднали спостереження «середніх» за мірою економічної динаміки груп робіт. Як свідчать розрахунки (табл. 1), високими часткові прирости кошторисної вартості будівельних матеріалів, виробів, комплектів x_m , тобто суми прямих та загальновиробничих витрат при виконанні конструктивного елементу x_k й нормативно-розрахункової трудомісткості x_m , визнаватимуться лише тоді, коли їх значення будуть наближатись до 39, 42 та 58% підсумкових величин відповідно. На нашу думку, для подальших аналітичних обґрунтувань перші два індикатори варто заокруглити до 40% ($c=0,4$), а суттєве зростання трудомісткості визнати близьким до 60% ($c=0,6$). Міра наближення кожної конкретної роботи, виконуваної на конкретному об'єкті до встановлених індикаторних рівнів і дає змогу визначити функції належності (табл. 1, остання графа). Аналогічно, несуттєвими по відношенню до енерговитрачання потрібно визнати 3%-вий приріст витрат будівельних матеріалів, виробів, комплектів й 2,5%-ві підвищення кошторисної вартості та витрат праці, обчислених за нормативами.

Хоча усі кластерні групи характеризуються середнім значенням і стандартним відхиленням, проте ми не вважаємо за доцільне використовувати гауссову функцію належності для характеристики нечітких термів. Гауссова функція належності являє собою редукований запис формули густини нормального закону розподілу випадкової величини, проте розподіл кожної із ознак вибірки далекий від нормального. Наприклад, на рис. 1 відображено графік розподілу часткового приросту нормативно-розрахункової трудомісткості (x_m), з якого помітно, наскільки фактичний розподіл не збігається із теоретичним, встановленим за нормальним законом, попри значиму статистику Хі-квадрат.

Тому тип функцій належності у табл.1. – дзвоноподібна ($\mu = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-c}{a}\right)^{2 \cdot b}}$), як

видно із записів, розрахунків її значень передбачає виключно елементарні арифметичні дії – і це перший аргумент на користь такої формули. По-друге, пріоритет дзвоноподібної (bell-shaped) функції пояснюється порівняно невеликим розміром досліджуваної вибірки – 268 спостережень. По-третє, цим полегшено процедури дефазифікації виходу фаззі-алгоритму за методом центру ваги на етапах подальшого розроблення систем інформаційної підтримки рішень із енергоменеджменту будівництва. Адже дзвоноподібна функція легко інтегрується у квадратурах, – це арктангенс центрованої оцінки відхилення фактичного показника динаміки (x) від моди терму (c). У той час як інтегрування гауссової

функції можливе тільки за допомогою чисельних методів. Попри сучасні спроможності комп'ютерної техніки для програмної реалізації фаззи-алгоритмів, можливість порівняно легкого «ручного» розрахунку дефазифікованого виходу алгоритму нечіткого логічного висновку робить його прозорим та сприяє більшій довірі користувачів, порівняно із широко розповсюдженими засобами штучного інтелекту, процедури нейромереж якого глибоко заховані до «чорної скриньки».

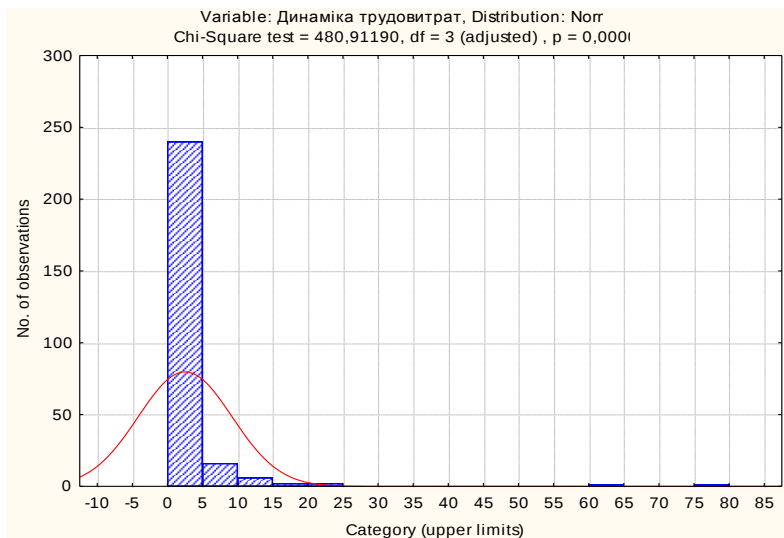


Рис. 1. Розподіл значень часткового приросту нормативно-розрахункової трудомісткості по вибірці із 268 будівельних об'єктів *(розроблено авторами)*

Застосування параметрів кластерного розбиття (табл. 1) та його фазифікованої інтерпретації дає підстави для розроблення науково обґрунтованого інструментарію контролінгу енерговитрат та передумов, які їх спричинили. Сутність інструментарію можна викласти у вигляді наступного алгоритму:

1. За даними кошторисної документації, такими, як локальний кошторис до «Договірної ціни», потрібно структурувати етапи виконання будівельних робіт. Ними можуть бути окремі розділи кошторисів, або завершені етапи будівельних робіт, що представлені не тільки «відкритими» нормами витрат ресурсів на будівництво, але і повним набором використовуваних будівельних матеріалів, виробів, комплектів.

2. Розрахувати питому вагу окремої роботи у загальному підсумку кошторисної вартості. Отримана частка у формуванні виробничої собівартості будівельного продукту визначатиме частковий приріст кошторисної вартості будівництва внаслідок виконання конструктивного елементу, x_k . Власне її варто розглядати як резерв посилення фінансових можливостей для оплати спожитих енергоресурсів. Стосовно даної частки можна було б сформулювати нечіткі терми «бездохідна», «помірна».

3. Виконати аналогічні обчислення часткових приростів кошторисної вартості будівельних матеріалів, виробів, комплектів (x_m), і нормативно-розрахункової трудомісткості (x_m).

4. Для всіх складових виконання будівельних робіт виконати розрахунки міри належності не до кожного із термів, а тільки до одного із трьох:

А) для кошторисної вартості встановити міру належності терму «суттєве зростання» – відповідно μ_k^3 ,

Б) для витрат будівельних матеріалів і нормативно-розрахункової трудомісткості встановити міру прийняття зростання як несуттєве, тобто розрахувати μ_m^1, μ_t^1 формулами табл.1.

1, 2, 3 – індекси позначення терму, відповідно 1 = «несуттєве зростання», 2 = «помірне зростання», 3 = «суттєве зростання».

5. Зробити висновок про доцільність посилення контролю енергоспоживання усіма структурними підрозділами будівельного підприємства на підставі виконання наступної умови:

$$1 - \mu_k^3 \geq (1 - \mu_m^1) + (1 - \mu_t^1) - (1 - \mu_m^1) \cdot (1 - \mu_t^1) \quad (1)$$

Іншими словами, будівельному підприємству критично необхідно забезпечення прискіпливого моніторингу енергоспоживання та максимального запобігання витрат енергоносіїв і електричної енергії, якщо по результатах виконання робіт кошторисна вартість не зростатиме суттєво, натомість матеріальні витрати або нормативно-розрахункова трудомісткість зростуть такою мірою, що їх динаміку не можна визнати як несуттєвою. Ми виділили частки «не» і «або» свідомо, оскільки у теорії нечітких множин обґрунтовано спеціальну процедуру заперечення. Для такого випадку міра належності аналітично визначається як різниця між 1 та значенням функції належності, що заперечується, саме тому формула 1 етапу 5 містить декілька різниць. Права ж частина даної формули реалізує один із способів визначення міри прийняття для операції об'єднання нечітких множин, що зіставне із сполучником або. Тоді для прийняття результату достатньо виконання тільки однієї передумови, будь-якої із сполучених зв'язкою або. Із існуючих способів, на нашу думку, варто віддати перевагу драстичному об'єднанню, яке більш об'єктивно враховує внесок обох передумов диз'юнкції у формування висновку імплікації. Саме тому на етапі 5 пропонується складніша конструкція, аніж широко розповсюджений спосіб обґрунтування міри прийняття за допомогою максимуму.

Висновки та перспективи подальших досліджень:

Енергоменеджмент підрядного підприємства має оперувати такими складовими кошторисного нормування, як матеріальні витрати, нормативно-розрахункова трудомісткість та загальна кошторисна вартість. Перші два показники дають змогу оцінити динаміку енергоспоживання, останній — передумови для своєчасного посилення розрахункової бази підрядника. Міру інтенсивності витрачань та надходжень виробничих і фінансових ресурсів необхідно визначати не лише у відносних показниках, але й за допомогою складових теорії нечітких множин — міри належності, яка обчислюється за допомогою функцій належності. Їх тип та параметри нами обґрунтовано за результатами кластерного аналізу основних етапів будівельних робіт, виконуваних на 15 об'єктах реконструкції будівель закладів освіти зі спорудженням об'єктів цивільного захисту. Кластерний аналіз було виконано відокремлено по кожній із складових формування енерговитрат будівельного

виробництва. Ризик виникнення дефіциту фінансового забезпечення розрахунків за спожиту енергію ми пропонуємо визначати шляхом обчислення міри відповідності фактичних складових формування вартості будівельного продукту наступній логічній умові: якщо за результатами виконання робіт кошторисна вартість **не** зростатиме суттєво, натомість матеріальні витрати **або** нормативно-розрахункова трудомісткість зростуть такою мірою, що їх динаміку **не** можна визнати як несуттєвою. Виконання цієї умови, відтворене за допомогою аналітичної формули, дає чіткий сигнал про необхідність посилення заходів, спрямованих на мінімізацію всіх видів енергоспоживання, причому не лише виробничим підрозділом підрядного підприємства, але й іншими структурними одиницями. Перспективою подальших досліджень обраного напрямку вбачаємо використання отриманих залежностей для проєктування керованої системи штучного інтелекту, що забезпечить управління енергоспоживанням на такому рівні, який не створюватиме загроз фінансовій безпеці будівельного підприємства.

Список літератури:

1. Бориченко О.В. Визначення об'єктів для оперативного контролю енергоефективності в системі енергетичного менеджменту. *Системи та технології*. 2019. № 1 (57). С. 20–35. <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2019-1-57-2>.
2. Бородіна О. Базові тренди повоєнної трансформації економіки України: бюджетна децентралізація, індустрія 4.0, регіональний енергоменеджмент. *Journal of Innovations and Sustainability*. 2022. № 6(1). 04. <https://doi.org/10.51599/is.2022.06.01.04>.
3. Козирева О.В., Новіков Д.А., Іванов М.Є. Теоретичні засади впровадження системи енергоменеджменту на підприємстві. *Індустрія туризму і гостинності в Центральній та Східній Європі*. 2021. № 1. С. 35-42. <https://doi.org/10.36477/tourismhospce-1-4>.
4. Крутогорський Я.В. Впровадження системи енергоменеджменту на промисловому підприємстві. *Збірник наукових праць Черкаського державного технологічного університету. Серія: Економічні науки*. 2017. Т. 1. № 44. С. 80–87. <https://doi.org/10.24025/2306-4420.1.44.2017.110691>.
5. Матвіїшин Є.Г. Просторовий енергетичний менеджмент у територіальних громадах: креативний досвід. *Ефективність державного управління*. 2024. № 78/79. С. 28–32. <https://doi.org/10.36930/507804>.
6. Ткач М.Є., Брич Б.В. Типологія комунальних підприємств в контексті енергоменеджменту. *Інклюзивна економіка*. 2024. № 1 (03). С. 88–95. https://doi.org/10.32782/inclusive_economics.3-14.
7. Фаренюк Г.Г., Фаренюк Є.Г. Реалізація параметричного методу у сучасних нормах з енергоефективності будівель. *Наука та будівництво*. 2023. Т. 35, № 1. С. 3–8. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2023-1>.
8. Росинський А.В., Онофрійчук І.І. Енергоефективність будівельного виробництва як інструмент розвитку економічного потенціалу девелоперської компанії. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2020. № 44. С. 31 – 39. <https://doi.org/10.32347/2707-501x.2020.44.31-39>.

9. Козик В.В., Марко О.Й. Організаційні засади формування енергоефективності об'єктів житлового будівництва. *Сталий розвиток економіки*. 2025. № 4(51). С. 435–440. <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-51-62>.

10. Мельничук Г.В. Енергоменеджмент населених пунктів та територій на основі інтелектуальних систем керування електроживленням. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019. № 4. С. 88–98. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2019.200503>.

11. Музика І.В., Кузнецов Д.І. Інформаційна система енергоменеджменту побутової техніки у системах типу "Інтелектуальний дім". *Вісник Криворізького національного університету*. 2017. № 45. С. 33–38. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu_2017_45_9.

12. Савицький О.М., Спиридоненков В.А., Циганкова С.Г. Інноваційна система енергоменеджменту ЖК "Панорама" у м. Дніпро. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 1 (019). С. 130–141. <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.270224.130.1033>.

13. Погребняк А.В., Кучер М.М., Сабіров О.В., Гриценко А.В., Зінченко Г.К. Інтеграційний підхід до енергоефективності у проєктуванні та будівництві об'єктів готельно-ресторанного бізнесу. *Системи та технології*. 2024. № 68(2). С. 190–196. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.23>.

14. Шевченко О.М., Шовкалюк М.М., Степанець О.В., Швайко В.Г. Розвиток системи автоматизованого моніторингу та аналізу енергоспоживання в КПП ім. Ігоря Сікорського. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2021. № 3. С. 93–100. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2021.251265>.

15. Росинський А.В. Використання алгоритмів нечіткого логічного висновку в системі управління розвитком економічного потенціалу девелоперської компанії. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2022. № 50 (2). С. 180–202. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(2\).180-202](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(2).180-202).

16. Каплун В.В., Штепа В.М., Макаревич С.С. Нейромережева модель прогнозування генерації електроенергії відновлювальними джерелами у системі енергоменеджменту локальних об'єктів. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019. № 2. С. 27–39. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2019.190002>.

17. Плєскач Б.М. Прецедентна підтримка прийняття рішень в енергоменеджменті. *Штучний інтелект*. 2020. № 25(2). С. 53–60. <https://doi.org/10.15407/jai2020.02.053>.

18. Rosynskiy A. The economic potential growth management for real estate development company through automation and artificial intelligence technologies. *Economics, Finance and Management Review*. 2023. № 3. С. 99–114. <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2023-3-99-114>.

19. Bielienskova O., Stetsenko S., Oliferuk S., Sapiga P., Horbach M., Toxanov S. Conceptual model for assessing the competitiveness of the enterprise based on fuzzy logic: social and resource factors. 2021 *IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/sist50301.2021.9465923>.

20. Rosynskiy A., Sorokina L., Kalashnikov D., Akizhanova A., Tormosov R., Malykhin M. Real Estate Price Management Through Fuzzified Time Impact Factors Using MATLAB: Development Companies' Approach. 2024 *IEEE 4th International*

Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), pp. 606 – 611. <https://doi.org/10.1109/sist61555.2024.10629393>.

21. Stetsenko S., Bolila N., Sorokina L., Tsyfra T., Molodid O. Monitoring mechanism of resilience of the anti-crisis potential system of the construction enterprise in the long-term period. *Economics, Finance and Management Review*. 2020. № 3. С. 29-40. <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2020-3-29>.

References:

1. Borychenko, O. V. (2019). Identification of objects for conducting operational control of energy efficiency in the energy management system. *Systems and Technologies*, 1(57), 20–35. <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2019-1-57-2>.

2. Borodina, O. (2022). Basic trends of postwar transformation of Ukraine's economy: industry 4.0, budgetary decentralization, regional energy management. *Journal of Innovations and Sustainability*, 6(1), 04. <https://doi.org/10.51599/is.2022.06.01.04>.

3. Kozyrieva, O., Novikov, D., & Ivanov, M. (2021). Theoretical principles of implementation of energy management systems at the enterprise. *Tourism and Hospitality Industry in Central and Eastern Europe*, (1), 35–42. <https://doi.org/10.36477/tourismhospcee-1-4>.

4. Krutogorskiy, Ya. (2017). Implementation of energy management system at industrial enterprise. *Proceedings of Scientific Works of Cherkasy State Technological University. Series: Economic Sciences*, 1(44), 80–87. <https://doi.org/10.24025/2306-4420.1.44.2017.110691>.

5. Matviishyn, Ye. (2024). Spatial energy management in territorial communities: creative experience. *Efficiency of Public Administration*, 1(78/79), 28–32. <https://doi.org/10.36930/507804>.

6. Tkach, M., & Brych, B. (2024). Typology of municipal enterprises in the context of energy management. *Inclusive economics*, 1 (03), 88–95. https://doi.org/10.32782/inclusive_economics.3-14.

7. Farenjuk, G., & Farenjuk, E. (2023). Implementation of the parametric method in modern standards on energy efficiency of buildings. *Science and Construction*, 35(1), 3–8. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2023-1>.

8. Rosynskiy, A.V., & Onofriichuk, I.I. (2020). Enerhoefektyvnist budivelnoho vyrobnytstva yak instrument rozvytku ekonomichnogo potentsialu developerskoi kompanii. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 44, 31–39. <https://doi.org/10.32347/2707-501x.2020.44.31-39>.

9. Kozyk, V., & Marko, O. (2025). Organizational principles of building energy efficiency of residential construction objects. *Sustainable development of economy*, 4(51), 435–440. <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-51-62>.

10. Melnychuk, H. (2019). Energy management of settlements and territories based on intelligent power management systems. *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*, (4), 88-98. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2019.200503>.

11. Muzyka, I.V., & Kuznietsov, D.I. (2017). Informatsiina systema enerhomenedzhmentu pobutovoi tekhniki u systemakh typu "Intelektualnyi dim". *Journal of Kryvyi Rih National University*, 45, 33-38. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu_2017_45_9.

12. Savytskyi, O.M., Spyrydonenkov, V.A., & Tsyhankova, S.H. (2024). Innovative energy management system of residential complex “Panorama” in Dnipro city.

Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture, 1 (019), 130–141. <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.270224.130.1033>.

13. Pogrebnyyak, A.V., Kucher, M.M., Sabirov, O.V., Grytsenko, A.V., & Zinchenko, H.K. (2024). Integrated approach to energy efficiency in design and construction of hotel and restaurant business objects. *Systems and Technologies*, 68(2), 190–196. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.23>.

14. Shevchenko, O., Shovkaliuk, M., Stepanets, O., & Shvaiko, V. (2021). Development of the system of automated monitoring and analysis of energy consumption in Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*, (3), 93-100. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2021.251265>.

15. Rosynskiy, A. (2022). Fuzzy logic inference algorithms utilization in the economic potential growth management system of the real estate development company. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 50(2), 180-202. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(2\).180-202](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(2).180-202).

16. Kaplun, V., Shtepa, V., & Makarevych, S. (2019). Neuro-network model for providing electricity generation by renewable sources in energy management system of local object. *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*, (2), 27–39. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2019.190002>.

17. Pleskach, B. (2020). Precedent support for decision-making in energy management. *Artificial Intelligence*, 25(2), 53–60. <https://doi.org/10.15407/jai2020.02.053>.

18. Rosynskiy, A. (2023). The economic potential growth management for real estate development company through automation and artificial intelligence technologies. *Economics, Finance and Management Review*, (3), 99–114. <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2023-3-99-114>.

19. Bieliukova, O., Stetsenko, S., Oliferuk, S., Sapiga, P., Horbach, M., & Toxanov, S. (2021). Conceptual model for assessing the competitiveness of the enterprise based on fuzzy logic: social and resource factors. In *2021 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/sist50301.2021.9465923>.

20. Rosynskiy, A., Sorokina, L., Kalashnikov, D., Akizhanova, A., Tormosov, R., & Malykhin, M. (2024). Real Estate Price Management Through Fuzzified Time Impact Factors Using MATLAB: Development Companies' Approach. In *2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, Astana, Kazakhstan, 606 – 611. <https://doi.org/10.1109/sist61555.2024.10629393>.

21. Stetsenko, S., Bolila, N., Sorokina, L., Tsyfra, T., & Molodid, O. (2020). Monitoring mechanism of resilience of the anti-crisis potential system of the construction enterprise in the long-term period. *Economics, Finance and Management Review*, 3, 29-40. <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2020-3-29>.

Ihor ONOFRIICHUK, Andrii ROSYNSKYI

Justification of the components of a digitalized energy consumption control toolkit for contracting enterprises

This article addresses the issue of managing energy efficiency in construction production for contracting enterprises, which arises due to the gaps between periods of energy resource consumption and the inflow of financial resources for their payment. It has been determined that traditional methods of assessing payment capacity deficits do

not provide a well-founded answer regarding the financial and energy security of construction enterprises. Given this, the article proposes conceptual foundations for designing intelligent energy consumption control systems for contracting enterprises, considering the formation of financial capabilities to cover expenditures on energy carriers and electricity.

Based on cost-estimating norms in construction, indicator variables have been justified, the variation of which serves as a basis for strengthening energy consumption control. Threshold values have been determined, where approaching them indicates the advisability or inadvisability of revising the energy intensity policy of construction production and its organization. The dynamics of resource consumption have been studied in accordance with the substantiated technological methods of performing construction works. It has been found that energy consumption growth is not uniform but depends on partial increases in the estimated cost of materials, construction, and the normatively calculated labor intensity.

The practical feasibility of applying quantitative indicator values using traditional mathematical statistics methods, particularly k-means clustering, has been proven. A detailed argument is provided in favor of using fuzzy set theory methods for energy consumption management in construction, specifically: membership functions, their types, quantity, and parameters; logical connections and structures; as well as the application of fuzzy logical statements.

The results of research aimed at justifying the components of a digitalized control toolkit are summarized in a comprehensive five-stage algorithm suitable for use by economic department specialists or management personnel without specialized IT project design education. At the same time, the obtained results hold significant scientific and practical potential for the development of artificial intelligence systems capable of managing energy consumption in contracting enterprises based on fuzzy logic and machine learning.

Keywords: construction energy management, energy efficiency, digitalization, construction production, energy saving, economic security of construction enterprises, cluster analysis, fuzzy set theory, cost management, controlling, artificial intelligence, management automation, estimated construction cost, normatively calculated labor intensity, economic efficiency of construction, construction organization, resource management, material costs, risks, correlation analysis.