

*Електронний журнал «Державне управління: удосконалення та розвиток» включено до переліку наукових фахових видань України з державного управління (Категорія «Б», Наказ Міністерства освіти і науки України № 1643 від 28.12.2019).
Спеціальність – 281.
Державне управління: удосконалення та розвиток. 2025. № 3.*

DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2156.2025.3.16>

УДК 330.4:621.311-047.44

*I. Я. Федунішин,
аспірант кафедри адміністративного та фінансового менеджменту,
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3709-6321>*

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ЗАХОДІВ

*I. Fedunyshyn,
Postgraduate student of the Department of Administrative and Financial
Management, Lviv Polytechnic National University*

MATHEMATICAL MODEL OF COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF ENERGY EFFICIENCY MEASURES

Робота присвячена розробці інтегрованої моделі для оцінки енергоефективності в державних установах, яка враховує економічні, соціальні, екологічні та безпекові аспекти. В контексті зростаючої потреби у сталому розвитку та оптимізації енергоспоживання, розглядається необхідність впровадження комплексного підходу для оцінки енергетичних проектів. Автори вводять ієрархічну модель критеріїв, яка допомагає систематизувати оцінку ефективності інвестицій у енергозберігаючі заходи,

з особливим фокусом на якісні властивості. Виконано експертне оцінювання вагових коефіцієнтів критеріїв з перевіркою узгодженості отриманих даних. Проведено аналіз альтернативних методів багатокритеріальної оцінки (TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE) та обґрунтовано вибір MAI. Окреслено обмеження підходу, зокрема його чутливість до суб'єктивності експертних оцінок. Запропоновано подальші напрями досліджень, такі як автоматизація оцінки через машинне навчання, розширення моделі для приватного сектора та включення аналізу ризиків для підвищення надійності оцінювання.

The paper is dedicated to the development of an integrated model for assessing energy efficiency in public institutions, considering economic, social, environmental, and security aspects. With the growing need for sustainable development and the optimization of energy consumption, the paper highlights the importance of a comprehensive approach for evaluating energy projects. The authors propose a hierarchical model of criteria that helps systematize the assessment of investments in energy-saving measures, with a particular focus on qualitative attributes. Expert evaluations of the weight coefficients of the criteria were conducted, with a consistency check of the obtained data.

The article presents an analysis of alternative multi-criteria evaluation methods (TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE) and justifies the choice of the Analytic Hierarchy Process (AHP). The study emphasizes the limitations of the proposed approach, particularly its sensitivity to subjective expert evaluations. Methods such as Fuzzy AHP and sensitivity analysis were applied to improve the robustness of the model, ensuring the stability of the obtained rankings. These approaches help to mitigate the risks of bias and enhance the reliability of the model's results.

Furthermore, the paper suggests several directions for future research, including the automation of the assessment process through machine learning, expanding the model to the private sector, and incorporating risk analysis for improving the reliability of the evaluations. These advancements aim to make the

model more adaptable and efficient in optimizing energy efficiency strategies across different sectors. By addressing these aspects, the proposed model aims to provide a comprehensive tool for decision-makers in both public and private institutions, ensuring that energy efficiency projects are assessed in a manner that balances financial, environmental, social, and security considerations.

In conclusion, this study provides a comprehensive framework for evaluating energy efficiency measures that considers the complexity of various factors. The integration of machine learning, risk analysis, and the expansion to include the private sector will further enhance the applicability of the model, making it a valuable tool for optimizing energy consumption in both public and private institutions, contributing to a sustainable future.

Ключові слова: *енергоефективність, енергоефективні проекти та заходи, державні установи, метод аналізу ієрархій, комплексна оцінка, соціально-економічні аспекти.*

Keywords: *energy efficiency, analytic hierarchy process, public institutions, economic efficiency, multi-criteria decision analysis.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах підвищення енергоефективності є одним із ключових пріоритетів сталого розвитку та економічної політики. Особливо це актуально для державних установ, які споживають значну кількість енергоресурсів, і для яких впровадження енергоефективних заходів може забезпечити зниження витрат, оптимізацію використання енергії та мінімізацію екологічного впливу.

Незважаючи на численні ініціативи у сфері енергозбереження, оцінка ефективності енергоефективних заходів залишається складним завданням. Традиційні методи аналізу часто орієнтовані лише на економічні показники та не враховують комплексного впливу таких факторів, як екологічна стійкість, соціальний ефект, комфорт та безпека.

Таким чином, постає проблема розробки методології, яка дозволить здійснювати комплексну оцінку енергоефективних заходів, враховуючи не лише економічні, а й екологічні, соціальні та безпекові аспекти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання оцінки енергоефективності активно досліджується у науковій літературі. Значна увага приділяється економічним аспектам енергозбереження, зокрема розрахунку рентабельності інвестицій у енергоефективні технології (Ранаде, 2017) [1]. У дослідженнях Диха М., (2018) [та](#); Адамса, (2006) розглядаються різні підходи до моніторингу та оцінки енергозбереження, включаючи використання математичних моделей та статистичних методів аналізу [2], [3]

Окремий напрямок досліджень стосується застосування методів багатокритеріального аналізу (MCDM) для оцінки енергоефективних заходів. У роботах Саті (1980), обґрунтовано доцільність використання методу аналізу ієрархій (MAI, АНР) для прийняття рішень у складних багатофакторних системах. Інші дослідження (Марінакіс, 2020) демонструють можливість застосування методів TOPSIS, ELECTRE та PROMETHEE для оптимізації вибору енергетичних проєктів[4]

Проте, незважаючи на значний науковий доробок, у наявних дослідженнях недостатньо розглядається питання комплексного підходу до оцінки енергоефективних заходів у державних установах, з урахуванням економічних, екологічних, соціальних та безпекових аспектів. Це створює необхідність у розробці інтегрованої моделі оцінки, яка дозволить системно аналізувати ефективність впровадження енергоефективних технологій.

Мета статті –розробка математичної моделі комплексної оцінки ефективності енергоефективних заходів у державних установах, що враховує економічні, екологічні, соціальні та безпекові аспекти. Для досягнення цієї мети передбачено вирішення наступних завдань:

- обґрунтувати вибір методу багатокритеріальної оцінки, порівнявши MAI з альтернативними підходами (TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE);

- розробити ієрархічну модель критеріїв, що дозволяє оцінювати ефективність інвестицій в енергоефективні заходи;
- здійснити експертне оцінювання вагових коефіцієнтів критеріїв та провести перевірку узгодженості оцінок;
- визначити основні фактори впливу на прийняття рішень у сфері енергозбереження та обґрунтувати можливі напрями подальших досліджень.

Запропонована модель сприятиме оптимізації вибору енергоефективних заходів у державному секторі та допоможе підвищити обґрунтованість управлінських рішень у сфері енергетики.

Виклад основного матеріалу дослідження. У сучасному світі, зростає увага до питань енергоефективності та сталого розвитку. Державні установи, як ключові гравці у сфері публічного управління, мають великий потенціал у впровадженні заходів, спрямованих на зменшення споживання енергії та покращення енергоефективності. Сучасні підходи до оцінки впровадження енергоефективних заходів часто виявляються фрагментарними та не ураховують всіх важливих моментів. Проте, для досягнення максимального ефекту від таких проєктів необхідно мати систему оцінки, яка враховуватиме не лише економічні показники, а й соціальні, екологічні та безпекові аспекти. Тому розробка комплексної моделі, є вельми актуальною та важливою для державних установ[5]

Перед зміною системи оцінювання варто наголосити на різниці між «енергозбереженням» та «енергетичною ефективністю». Ці поняття часто помилково використовуються як взаємозамінні. Основна відмінність полягає в тому, що «енергетична ефективність» визначає, наскільки результативно використовується енергія для досягнення певного результату, тоді як «енергозбереження» стосується зниження витрат енергії без зміни результату [6]

Згідно закону України «Енергетична ефективність будівлі» це властивість будівлі, що характеризується кількістю енергії, необхідної для створення належних умов проживання та/або життєдіяльності людей у такій будівлі [7]. Європейське тлумачення «енергетична ефективність будівлі» означає розраховану або виміряну кількість енергії, необхідну для задоволення потреби в енергії, пов'язаної з типовим використанням будівлі, яка включає, серед іншого, енергію, що використовується для опалення, охолодження, вентиляції, гарячої води та освітлення [8].

Зокрема «енергоефективні заходи» - дії технічного, організаційного, економічного, інформаційного характеру або їх сукупність, результатом реалізації яких є підвищення енергетичної ефективності (зниження питомих витрат), яке можна виміряти або розрахувати[7].

Дані визначення не охоплюють повну картину цілей, які сьогодні покладаються на заходи з енергоефективності. В сучасних умовах важливо не лише зменшення споживання енергії, але й забезпечення сталого розвитку, зниження екологічного впливу, покращення комфорту та безпеки користувачів, а також відповідати викликам військового часу[1], [3]. Тому, більш широке та комплексне розуміння енергоефективності включає в себе не лише аспекти зниження енергоспоживання, а й урахування соціальних, економічних, екологічних та безпекових вимог[9], [10]

Сучасні методи оцінки ефективності енергозберігаючих проєктів базуються на стандартних показниках економічної вигоди від інвестицій, при цьому враховуються як внутрішні, так і зовнішні фактори, що впливають на реалізацію таких проєктів. Основу для цього утворюють нормативні документи, зокрема Державний стандарт України ДСТУ 2155-93 "Енергозбереження. Методи визначення економічної ефективності заходів по енергозбереженню". Цей стандарт використовує показник інтегральної дисконтованої розрахункової зміни прибутку, що враховує прибуток від енергозбереження та зменшення платежів за забруднення навколишнього середовища[11] Однак, важливо відзначити, що ця методика не враховує

додаткових доходів від реінвестування коштів, вартість проекту у рік та ліквідаційну вартість проекту, і не має обґрунтованого визначення показника внутрішньої ефективності проекту[12]

Особливу увагу потрібно звернути на результати соціального, безпекового та екологічного характерів, які визначення їх величини є предметом дискусії через їх складність в економічному вимірі. Крім того, дані складові не є стандартизованими, тобто для різних проектів вони можуть бути різними, що ускладнює застосування єдиної методології оцінки. Навіть при відносній однотипності у подібних проектах, їх оцінка залишається складною та не гарантує повноцінності та належної обґрунтованості реалізації інвестиційного проекту.

Зазначені результати можна поділити на дві категорії: 1) ті, які можна обчислити за допомогою простих математичних методів через їх кількісний характер, наприклад, ефект від створення нових робочих місць; 2) ті, які не піддаються точному обчисленню через їх якісний характер, наприклад, покращення якості послуг з теплопостачання внаслідок реконструкції шкіл або дитячих садків. Останній вид ефектів навряд чи можна виразити у вартісному виразі через їх складність і неможливість кількісного вимірювання, що негативно впливає на здатність відобразити реальний внесок проекту[12]

Для оцінки ефективності енергоефективних заходів існує кілька методів багатокритеріального аналізу, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Основними є: метод аналізу ієрархій (MAI), методи TOPSIS, ELECTRE та PROMETHEE.

Наведено основні характеристики та відмінності між цими методами (Табл. 1).

Таблиця 1. Порівняння методів багатокритеріального аналізу

Метод	Суть підходу	Переваги	Недоліки
Метод аналізу ієрархій (MAI, АНР)	Побудова ієрархічної структури критеріїв, парні порівняння, визначення вагових коефіцієнтів	1. Врахування якісних та кількісних критеріїв 2. Можливість перевірки узгодженості експертних оцінок 3. Чітка ієрархічна структура прийняття рішень	1. Чутливість до суб'єктивності експертних оцінок 2. Велика кількість парних порівнянь при великій кількості критеріїв
TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)	Визначення найкращої альтернативи на основі близькості до ідеального та антиідеального рішень	1. Висока обчислювальна ефективність 2. Добре працює з великими наборами даних 3. Менша суб'єктивність порівняно з MAI	1. Не враховує взаємозв'язок між критеріями 2. Не підходить для оцінки якісних критеріїв 3. Потребує нормалізації даних
ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality)	Порівняння альтернатив у форматі парного ранжування, усунення слабших рішень	1. Підходить для складних багатофакторних рішень 2. Враховує взаємозалежність критеріїв 3. Гнучкість у роботі з невизначеними даними	1. Складний математичний апарат 2. Висока залежність від вибору порогових значень 3. Важко інтерпретувати результати
PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)	Порівняння альтернатив на основі переваг між кожною парою	1. Гнучкість у виборі функцій переваг 2. Добре підходить для багатокритеріальних оцінок 3. Може враховувати як суб'єктивні, так і об'єктивні критерії	1. Вимагає великої кількості вхідних параметрів 2. Потребує складних розрахунків 3. Важко визначити оптимальні функції переваги

Джерело: сформовано на основі [13], [14], [15].

Враховуючи складність аналізу енергоефективності, що включає економічні, соціальні, екологічні та технічні фактори, метод аналізу ієрархій (MAI) є найбільш підходящим інструментом для оцінки таких заходів. Хоча TOPSIS добре підходить для суто кількісних порівнянь, а ELECTRE та PROMETHEE ефективні для багатофакторного аналізу, вони не забезпечують

такого рівня структуризації та гнучкості, як МАІ. Використання МАІ дозволяє систематизувати процес оцінки, контролювати узгодженість експертних думок та порівнювати альтернативи з урахуванням комплексних факторів, що робить його найбільш придатним методом для даного дослідження.

У зв'язку з цим запропоновано нову модель оцінки енергоефективних заходів, яка дасть можливість в комплексі розглянути доцільність впровадження як проекту загалом, так і окремих їх частин на основі ієрархічної моделі критеріїв аналізу. Ця модель допомагає визначити, які фактори та у якій мірі впливають на якість або на інший інтегральний параметр проєктованого продукту [2], [13], [16]

При реалізації на практиці конкретних заходів з енергоефективності, список найважливіших критеріїв має бути визначений з урахуванням особливостей самої будівлі. Однак, оскільки основною метою дослідження є розробка універсальної технології, критерії повинні мати загальні характеристики, що застосовні для різних випадків.

На першому етапі відбувається формулювання цілей, які необхідно досягти і критеріїв, за якими будуть оцінюватися альтернативи.

Основна ціль: зменшення споживання енергоресурсів.

Додаткові цілі: підвищення комфорту для відвідувачів та працівників будівель; забезпечення сталого розвитку та зменшення негативного впливу на довкілля; зменшення залежності від зовнішніх джерел.

Для створення загальної моделі приймаємо наступні критерії та підкритерії, які використовуються для створення комплексної оцінки енергоефективних заходів у рамках методу аналізу ієрархій, дозволяючи інвесторам та менеджерам проєктів систематично порівнювати різні варіанти поліпшення енергоефективності:

А) Економічність:

-вартість впровадження енергоефективних технологій. Початкові витрати на закупівлю та встановлення систем енергоефективності.

-економічна ефективність проекту в перспективі. Довготермінова вигода від інвестицій в енергоефективність, включаючи окупність витрат.

Б) Енергоефективність:

-енергозбереження. Зниження загального споживання енергії завдяки впровадженню заходів;

-використання відновлювальних джерел енергії: Інтеграція сонячних панелей, вітрових турбін тощо для забезпечення потреб в енергії.

В) Сталість розвитку:

-тривалість дії енергоефективних заходів та їхній внесок у забезпечення сталого розвитку. Оцінка довгострокового впливу на екологію та суспільство;

-можливість адаптації до змінних умов: Гнучкість енергоефективних рішень перед обличчям змін клімату та інших зовнішніх чинників.

Г) Комфорт:

-ступінь задоволення користувачів від умов праці та перебування в будівлях (включає температуру, вентиляцію, освітлення тощо);

-якість освітлення, температурний режим, вентиляція: Специфічні аспекти, що впливають на здоров'я та добробут людей.

Д) Подальше обслуговування:

-вартість підтримки та обслуговування енергоефективних систем. Регулярні витрати на утримання систем в оптимальному стані;

-надійність та доступність сервісу. Оцінка здатності системи працювати безперебійно та її легкість у обслуговуванні.

Е) Безпека:

-стійкість до відключень. Здатність системи підтримувати роботу або швидко відновлюватись після збоїв в енергопостачанні;

-стійкість до фізичних впливів. Захист від зовнішніх факторів, таких як екстремальні погодні умови або механічні пошкодження;

-захист від несанкціонованого доступу. Заходи для запобігання неавторизованому втручанню, що може призвести до витоку даних або збоїв у роботі системи[4]

Ієрархію зображено на рис.1.



Рисунок 1. Ієрархічна модель цілей та критеріїв

Джерело: Систематизовано, узагальнено та згруповано автором

На наступних етапах методу аналізу ієрархій для оцінки енергоефективних заходів ми використовуємо парний порівняльний аналіз для оцінки критеріїв, які були визначені на попередніх етапах. Це дозволяє визначити важливість кожного критерію відносно інших, що є ключовим для прийняття обґрунтованих рішень.

Парний порівняльний аналіз полягає у створенні матриць парних порівнянь для кожного критерію, де експерти оцінюють важливість одного елемента відносно іншого за допомогою шкали від 1 до 9 [17]

Для формування матриць парних порівнянь та визначення вагових коефіцієнтів критеріїв було залучено 7 експертів, що представляли різні галузі: 2 науковця у сфері енергетики, будівництва та енергоефективності; 3 інженери-проектувальники з досвідом впровадження енергоефективних рішень; 3 представники державного сектору, відповідальні за реалізацію енергозберігаючих проектів.

Оцінювання здійснювалося методом анонімного анкетування, що дозволяло уникнути групового впливу та суб'єктивного тиску. Крім того, було застосовано метод Дельфі у два етапи:

- перший етап – експерти самостійно заповнювали матриці парних порівнянь;
- другий етап – експертам були представлені середні оцінки, після чого вони могли переглянути свої відповіді для підвищення узгодженості.

У Таблиці 2 представлені результати парних порівнянь критеріїв, які використовувалися в методі аналізу ієрархій (МАІ, АНР). Значення, наведені у таблиці, отримані шляхом експертного оцінювання відносної важливості одного критерію порівняно з іншим за шкалою Сааті (1980).

Шкала Сааті задає числові значення для парних порівнянь:

- 1 – обидва критерії однаково важливі
- 3 – один критерій помірно важливіший за інший
- 5 – один критерій значно важливіший
- 7 – один критерій дуже значно важливіший
- 9 – один критерій надзвичайно важливіший
- 2, 4, 6, 8 – проміжні значення для уточнення експертних оцінок.

Обернені значення ($1/2$, $1/3$, $1/5$ тощо) використовуються, коли критерій у стовпці менш важливий за критерій у рядку

Наприклад, у таблиці значення $1/3$ у комірці, що порівнює "Комфорт" з "Економічністю", означає, що експерти оцінюють "Комфорт" як менш важливий порівняно з "Економічністю", а значення 3 у дзеркальній комірці (порівняння "Економічності" з "Комфортом") означає, що "Економічність" є помірно важливішою за "Комфорт".

Після заповнення матриці парних порівнянь було обчислено вектори пріоритетів (w_i), що відображають вагу кожного критерію в загальній оцінці енергоефективних заходів.

Таблиця 2. Результатів парних порівнянь за критеріями другого рівня

Номер рядка (i)	Критерії	Номер стовпця матриці (j)						Вектор пріоритетів (wi)	Інтенсивність відносної важливості (ІВ)	Частина
		1	2	3	4	5	6			
1	Економічність	1	1	5	3	6	3	3,06	1,90	4,84
2	Енергоефективність	1	1	½	3	6	5	2,14	1,88	6,83
3	Сталість розвитку	1/5	1/2	1	1/3	½	½	0,38	0,38	7,79
4	Комфорт	1/3	1/3	3	1	4	1	1,06	0,80	5,85
5	Подальше обслуговування	1/6	1/6	2	¼	1	1/2	0,37	0,34	7,17
6	Безпека	1/3	1/5	2	1	2	1	0,77	0,61	6,23
Власне значення матриці (λ_{max})						6,45				
Індекс узгодженості (ІУ)						0,09				
Усереднене значення індексу узгодженості (УІУ)						1,12				
Відносна узгодженість (ВУ)						0,07(7%)				

Джерело: Систематизовано, узагальнено та згруповано за даними автора

Таблиця подає кількісні оцінки важливості шести основних критеріїв, які були визначені для оцінки енергоефективних заходів у державних установах. Вектори пріоритетів (wi), інтенсивність відносної важливості (ІВ), та частка для кожного критерія розраховуються на основі парних порівнянь, виконаних експертами.

Кожен критерій має свій номер рядка (i), що відповідає таким аспектам оцінки, як економічність, енергоефективність, сталість розвитку, комфорт, подальше обслуговування та безпека. Вектор пріоритетів (wi) відображає вагу кожного критерію в загальній оцінці, вказуючи на їх відносну важливість.

Інтенсивність відносної важливості (ІВ) та частка вказують на ступінь переваги одного критерію над іншими.

Таблиця 1 включає розрахунок власного значення матриці (λ_{\max}), індекс узгодженості (ІУ), усереднене значення індексу узгодженості (УІУ), та відносну узгодженість (ВУ). Ці показники важливі для перевірки консистентності оцінок експертів.

Оцінка енергоефективних заходів методом аналізу ієрархій (МАІ) має певні обмеження, зокрема, чутливість до суб'єктивності експертних оцінок. Для оцінки узгодженості експертних оцінок використовувався індекс узгодженості (ІУ), що визначається за формулою:

$$UI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

де λ_{\max} – найбільше власне значення матриці парних порівнянь,
 n – кількість критеріїв.

У нашому випадку значення $UI = 0.09$, що вказує на прийнятний рівень узгодженості.

Було перевірено, як змінюється ранжування критеріїв при варіації ваг на $\pm 5\%$.

Прийнято, якщо рівень ВУ не перевищує 10%, то оцінки вважаються достатньо узгодженими для обґрунтування прийнятих рішень. У нашому випадку, ВУ становить 7%, що вказує на високий рівень узгодженості експертних оцінок.

Результати показали, що навіть при зміні ваг у межах цієї похибки загальний порядок пріоритетів критеріїв залишається стабільним, що підтверджує стійкість моделі.

Таким чином, використання цих підходів дозволило мінімізувати вплив суб'єктивності та підвищити достовірність отриманих результатів.

На основі даних створено діаграму (рис.2) для візуалізації векторів пріоритетів (w_i) для кожного критерію, що дозволить краще зрозуміти розподіл вагомості між ними та на що саме варто звернути особливу увагу при аналізі.

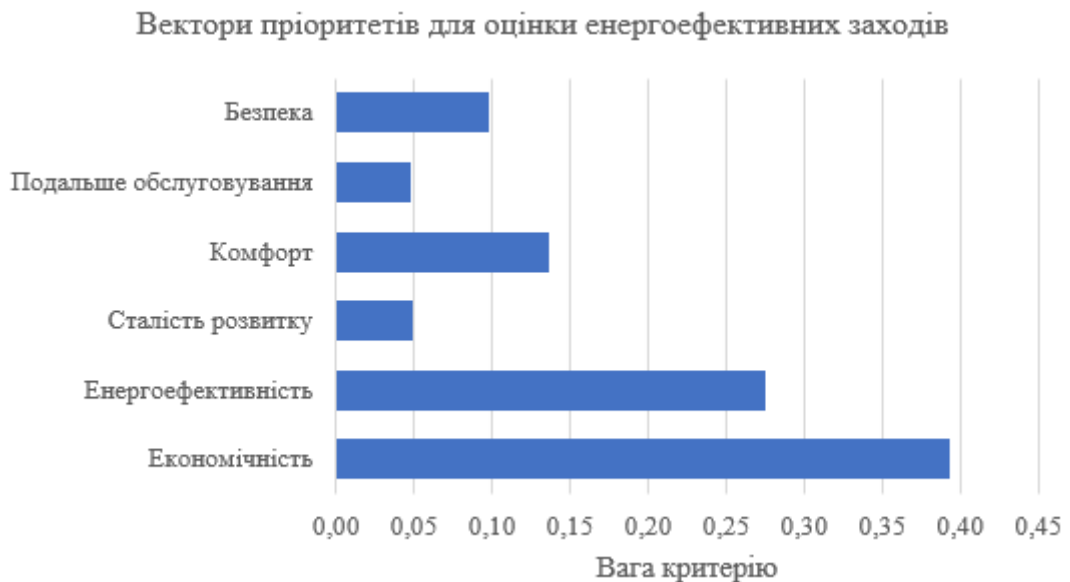


Рис.2 Вектори пріоритетів для оцінки енергоефективних заходів

Джерело: Систематизовано, узагальнено та згруповано за даними автора

На діаграмі вище представлені вектори пріоритетів (w_i) для кожного з шести критеріїв, які використовуються у моделі оцінки енергоефективних заходів. З діаграми можна зробити кілька важливих висновків:

- економічність має найвищу вагу (0.39) серед усіх критеріїв, що підкреслює значення фінансової ефективності проектів з підвищення енергоефективності;
- енергоефективність також є ключовим критерієм з вагою 0.28, вказуючи на важливість зниження споживання енергії та використання відновлювальних джерел;
- критерії Сталість розвитку та Подальше обслуговування мають найнижчі ваги (відповідно 0.05 і 0.05), що свідчить про їх відносно меншу, але все ж важливу роль у загальній системі оцінки;
- комфорт і безпека мають помірні ваги (0.14 і 0.1 відповідно), підкреслюючи необхідність забезпечення задовільних умов праці та проживання, а також зниження ризиків для безпеки.

Ці результати підкреслюють, що при розробці та оцінці енергоефективних заходів, особливу увагу слід приділяти не лише фінансовій

вигоді, а й забезпеченню високої енергоефективності, при цьому не ігноруючи аспекти сталого розвитку, комфорту, безпеки та ефективності обслуговування.

На основі отриманих ваг для кожного критерію може бути проведено розрахунок загальної оцінки альтернативних варіантів енергоефективних заходів. Це дозволяє ранжувати альтернативи від найкращої до найгіршої та обрати оптимальний варіант.

Аналіз показав, що при розробці та оцінці енергоефективних заходів особливу увагу слід приділяти енергоефективності та економічності, оскільки ці критерії мають найвищі ваги. Це вказує на те, що інвестиції в технології, які сприяють зниженню споживання енергії та економії джерел енергії, є найбільш важливими.

Також, важливість критеріїв комфорту, безпеки та подальшого обслуговування підкреслює необхідність враховувати здоров'я користувачів будівель, а також ефективність та надійність енергоефективних систем у довгостроковій перспективі.

Таким чином, при виборі між альтернативами енергоефективних заходів, слід керуватися не тільки економічною вигодою, а й впливом на довкілля, сталість розвитку, комфорт та безпеку.

Варто звернути увагу на те, що дана модель є концепцією і повинна змінюватись залежно від потреб громади та окремої будівлі.

Висновок. Впровадження енергоефективних заходів у державних установах – це не лише питання економії коштів, але й важливий крок на шляху до сталого розвитку. Запропонована в даній роботі комплексна модель оцінки таких заходів дає можливість врахувати не лише економічні, але й соціальні, екологічні та безпекові аспекти.

Модель ґрунтується на ієрархічній системі критеріїв, що дозволяє систематизувати оцінку ефективності інвестицій у енергозберігаючі заходи, з особливим фокусом на якісні властивості. Результати аналізу показали, що найважливішими критеріями є енергоефективність та економічність. Важливість комфорту, безпеки та подальшого обслуговування підкреслює

необхідність враховувати здоров'я користувачів будівель, а також ефективність та надійність енергоефективних систем у довгостроковій перспективі.

У процесі розробки та аналізу комплексної моделі оцінки енергоефективних заходів для державних установ було виявлено критичну важливість інтегрованого підходу, що охоплює широкий спектр критеріїв — від економічних до соціальних, екологічних, та безпекових аспектів. Виходячи з цього, стає зрозумілим, що ефективне впровадження енергоефективності вимагає не тільки технологічних інновацій та фінансових інвестицій, але й глибокого розуміння багатовимірності впливу таких заходів на суспільство та довкілля.

Застосування методу аналізу ієрархій дозволяє систематизувати та кількісно оцінити ці критерії, підкресливши взаємозв'язок між енергоефективністю та сталим розвитком. Наші результати вказують на те, що найбільш ефективні проекти з точки зору енергоефективності також сприяють загальному покращенню умов життя, зниженню екологічного впливу та підвищенню рівня безпеки установ.

Ця робота наголошує на необхідності ширшого прийняття та впровадження інтегрованих методик оцінки у процесах прийняття рішень, пов'язаних з енергозбереженням у державних установах. Враховуючи складність і мультидисциплінарний характер енергоефективності, важливо забезпечити, щоб рішення ґрунтувалися на всебічному аналізі, який включає як традиційні економічні показники, так і менш очевидні, але не менш важливі соціальні та екологічні аспекти.

Ми сподіваємося, що наш внесок стане основою для подальших досліджень у цій галузі та сприятиме розробці більш ефективних та відповідальних політик у сфері енергозбереження. Прагнення до сталого розвитку вимагає від нас не тільки визначення оптимальних рішень за допомогою сучасних методик оцінки, але й розуміння ширшого контексту наших виборів та їх довгострокових наслідків для суспільства та природи.

Важливим напрямком подальших досліджень є розробка методів кількісної оцінки якісних критеріїв, таких як комфорт та безпека.

Впровадження комплексної оцінки енергоефективних заходів може стати корисним інструментом для прийняття обґрунтованих рішень щодо впровадження таких заходів у державних установах, що сприятиме не лише економії ресурсів, але й покращенню умов праці та життя людей.

Таким чином, розробка та впровадження комплексної моделі оцінки енергоефективних заходів стає ключовим елементом у забезпеченні сталого розвитку державних установ та суспільства в цілому, відкриваючи нові горизонти для досягнення балансу між розвитком та збереженням нашого спільного майбутнього.

Подальші дослідження повинні зосередитися на покращенні точності оцінки, розробки інтегрованої методики з урахуванням ризиків, автоматизації процесу аналізу та розширенні моделі для застосування у різних секторах. Це дозволить підвищити ефективність впровадження енергозберігаючих технологій та забезпечити їхню економічну та екологічну обґрунтованість.

Література

1. М. Ранаде, М. Босі, С. Міллс-Кнапп, Стефан де ла Рю дю Кан та Міжнародний інститут збереження енергії (2017), "Технічний звіт 011. Оцінка та вимірювання ефективності енергозберігаючих проєктів."
2. М. Диха (2018), "Інноваційні методи оцінки ефективності енергозберігаючих проєктів," Академія стратегічного управління, т. 17, № 2, с. 1–11.
3. С. Адамс, В. Аннеке, Е. Блауштайн, А. Жобер, Е. Проскурня та С. Наппез (2006), "Керівництво з моніторингу та оцінки енергетичних проєктів."
4. В. Марінакіс (2020), "Великі дані для управління енергоспоживанням та енергоефективними будівлями," *Energies (Basel)*, т. 13, № 7, с. 1555, берез., doi: 10.3390/en13071555.

5. Ф. Аль Шарарі, О. Ємельянов, Ю. Дзюраха, О. Сокіл та О. Данилович (2022), "Вплив енергозберігаючих проєктів на рівень фінансової стабільності підприємства," Економічний вісник-XXI, т. 195(1–2), с. 36–49.
6. П. Бертольдї, М. Економїду, В. Палермо, Б. Боза-Кїсс та В. Тодескі (2021), "Як фінансувати енергетичну модернізацію житлових будівель: огляд поточних і нових фінансових інструментів в ЄС," WIREs Energy and Environment, т. 10, № 1, січ., doi: 10.1002/wene.384.
7. Закон України (2017), "Про енергетичну ефективність будівель" [Електронний ресурс] <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>.
8. Директива Європейського Парламенту та Ради (2010), "2010/31/EU" [Електронний ресурс] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02010L0031-20210101>.
9. В. Лесїнський, О. Ємельянов, О. Зарицька, А. Симак та О. Колещук (2018), "Обґрунтування проєктів з урахуванням ризиків у ресурсозберігаючих технологічних змінах на підприємствах," Східно-Європейський журнал підприємницьких технологій, т. 6, № 1 (96), с. 6–16, груд., doi: 10.15587/1729-4061.2018.149942.
10. В.К. Збарський, Н.В. Трусова, О.Г. Сокіл, Н.В. Почерніна та М.І. Грицаєнко (2020), "Соціально-економічні детермінанти розвитку ресурсного потенціалу малих форм аграрного виробництва в Україні," Системи промислового інжинірингу та менеджменту, т. 19, № 1, с. 133–142.
11. ДСТУ 2155-93 (1993), "Енергозбереження. Методи визначення економічної ефективності заходів з енергозбереження."
12. І.А. Вакуленко, О.М. Телїженко та Ю.О. Мірошніченко (2014), "Методичні підходи до оцінки соціо-еколого-економічної ефективності інвестиційних проєктів з енергозбереження," Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит, т. 11, с. 40–51.
13. О. Артюшенко (2023), "Застосування методу багатокритеріальної оптимізації для прийняття рішень у сфері фінансового забезпечення військових підрозділів," Вісник Київського національного університету імені

Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки, № 2(54), с. 36–40, doi: 10.17721/1728-2217.2023.54.36-40.

14. А.Є. Буряченко та Н.В. Куць (2018), "Застосування методів багатокритеріального аналізу у стратегічному плануванні діяльності фінансових установ," Економіка та підприємництво: збірник наукових праць, т. 41, с. 224–236.

15. С.К. Саху та С.С. Госвами (2023), "Комплексний огляд методів багатокритеріального прийняття рішень (MCDM): досягнення, застосування та майбутні напрями," Decision Making Advances, т. 1, № 1, с. 25–48, груд., doi: 10.31181/dma1120237.

16. М.Г. Бадюл та В.А. Крамаренко (2013), "Застосування методу аналізу ієрархій у проектуванні," Будівництво, матеріалознавство, машинобудування, т. 70, с. 27–35.

17. Х.Б. Кульчицька та Л.С. Предко (2018), "Застосування методу аналізу ієрархій для відбору проектів у поліграфічній промисловості," Технічні науки, т. 1 (75), с. 51–59.

References

1. Ranade, M. Bosi, M. Mills-Knapp, S. and de la Ryu du Can, S. (2017), "Technical Report 011. Evaluation and Measurement of the Effectiveness of Energy-Efficient Projects.", International Institute for Energy Conservation.

2. Dycha, M. (2018), "Innovative Methods of Evaluating the Effectiveness of Energy-Efficient Projects", Academy of Strategic Management, Vol. 17, No. 2, pp. 1–11.

3. Adams, S. Anneke, V. Blauštajn, E. Zober, A. Proskurnya, E. and Nappez, S. (2006), "Guidelines for Monitoring and Evaluation of Energy Projects".

4. Marinakis, V. (2020), "Big Data for Managing Energy Consumption and Energy-Efficient Buildings", Energies (Basel), Vol. 13, No. 7, p. 1555. doi: 10.3390/en13071555.

5. F. Al Sharari, O. Yemelyanov, Yu. Dzyurakh, O. Sokil and O. Danilovych (2022), "Impact of Energy-Efficient Projects on the Financial Stability of Enterprises," *Economic Bulletin-XXI*, Vol. 195(1–2), pp. 36–49.
6. Bertoldi, P. Ekonomidu, M. V. Palermo, B. Boza-Kiss and V. Todeski (2021), "How to Finance Energy Modernization of Residential Buildings: A Review of Current and New Financial Instruments in the EU", *WIREs Energy and Environment*, Vol. 10, No. 1. doi: 10.1002/wene.384.
7. Verkhovna Rada of Ukraine (2017), Law of Ukraine "On Energy Efficiency of Buildings", available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text> (Accessed 05 March 2025).
8. European Parliament and Council (2010), "Directive 2010/31/EU", available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02010L0031-20210101> (Accessed 05 March 2025).
9. Lesinsky, V. Yemelyanov, O. Zarytska, O. Symak, A. and Koleschuk, O. (2018), "Justification of Projects Considering Risks in Resource-Saving Technological Changes at Enterprises", *Eastern European Journal of Entrepreneurial Technologies*, Vol. 6, No. 1 (96), pp. 6–16, December, doi: 10.15587/1729-4061.2018.149942.
10. Zbarskyi, V.K. Trusova, N.V. Sokil, O.H. Pocherkhina, N.V. and Hrytsaienko, M.I. (2020), "Socio-Economic Determinants of the Development of Resource Potential of Small Forms of Agricultural Production in Ukraine," *Systems of Industrial Engineering and Management*, Vol. 19, No. 1, pp. 133–142.
11. State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine (1993), "DSTU 2155-93 Energy Conservation. Methods for Determining the Economic Efficiency of Energy-Saving Measures."
12. I.A. Vakulenko, O.M. Telizhenko and Yu.O. Miroshnychenko (2014), "Methodological Approaches to Evaluating the Socio-Ecological-Economic Efficiency of Energy-Saving Investment Projects", *Energy Conservation. Energy. Energy Audit*, Vol. 11, pp. 40–51.

13. Artyushenko, O. (2023), "Application of the Multicriteria Optimization Method for Decision-Making in the Financial Support of Military Units", Bulletin of Kyiv National Taras Shevchenko University. Military Special Sciences, vol. 2(54), pp. 36–40. doi: 10.17721/1728-2217.2023.54.36-40.
14. Buryachenko, A.Ye. and Kuts, N.V. (2018), "Application of Multicriteria Analysis Methods in Strategic Planning of Financial Institutions", Economics and Entrepreneurship: Collection of Scientific Papers, Vol. 41, pp. 224–236.
15. Sahu, S.K. and Goswami, S.S. (2023), "Comprehensive Review of Multicriteria Decision-Making (MCDM) Methods: Achievements, Applications, and Future Directions", Decision Making Advances, Vol. 1, No. 1, pp. 25–48. doi: 10.31181/dma1120237.
16. Badyul, M.H. and Kramarenko, V.A. (2013), "Application of the Hierarchical Analysis Method in Design", Construction, Materials Science, Machine Engineering, Vol. 70, pp. 27–35.
17. Kulchitska, Kh.B. and Predko, L.S. (2018), "Application of the Hierarchical Analysis Method for Project Selection in the Printing Industry", Technical Sciences, Vol. 1 (75), pp. 51–59.

Стаття надійшла до редакції 13.03.2025 р.