

УДК 697.1:004.942

Н. В. Коменда*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5944-8665>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

І. В. Грицюк

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4472-306X>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

В. І. Волинець

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9192-2785>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

А. В. Гадай

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4195-7218>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Д. Т. Коменда

аспірант третього року навчання

спеціальності прикладна математика

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

* автор-кореспондент, e-mail: nykomenda@gmail.com

Наукові підходи до оцінки енергоефективності будівель

Цитувати як:

Коменда, Н. В., Грицюк, І. В., Волинець, В.І., Гадай, А. В., Коменда, Д.Т. (2025). Наукові підходи до оцінки енергоефективності будівель. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 123-131. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-12)

© 2025, Коменда, Н. В., Грицюк, І. В., Волинець, В.І., Гадай, А. В., Коменда, Д.Т.

Анотація. У роботі розглянуто актуальні наукові підходи до визначення енергоефективності будівель у сучасних умовах. Це стає все більш важливим завданням у контексті сталого розвитку та глобального переходу до використання енергоощадних технологій. Зростання вимог щодо зменшення споживання енергетичних ресурсів та покращення якості середовища всередині будинків зацікавлюють застосування новаторських методик у сфері енергетичного моделювання та аналізу. У роботі проаналізовано ключові методи, серед яких математичне моделювання - ефективний спосіб прогнозування енергоспоживання будівель, що базується на створенні детальних фізичних моделей теплових і

енергетичних процесів. Це дозволяє враховувати конструктивні особливості будівлі, кліматичні умови, режими експлуатації тощо.

На особливу увагу заслуговує застосування штучного інтелекту і його алгоритмів машинного навчання в технологіях глибокого навчання та штучних нейронних мереж. Це дозволяє автоматично обробляти великі обсяги даних з сенсорів та систем моніторингу і дистанційного зондування. Такий підхід сприяв покращенню точності прогнозувань та адаптивності моделей до реальних умов. Крім цього, досліджено сучасні методи оцінки енергоефективності на основі порівняльного аналізу фактичного енергоспоживання з прогнозованими показниками. У статті детально розглянуто можливості використання дистанційного зондування Землі для виявлення теплових втрат, дефектів у конструкціях та оцінки енергетичного стану будівель на основі інформаційних матеріалів, отриманих за допомогою супутникових або аерофотознімків.

Особлива увага приділялася поширенню використання технологій моделювання інформаційних систем будівництва (Building Information Modeling, BIM) разом з методами аналізу життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA), що дозволяють оцінити енергоефективність на всіх етапах життя будинку - від концепційного стадіону через проектування та будівництво до експлуатаційного перебування та ремонту.

Обговорено можливості подальшого розвитку вищезазначених підходів у контексті цифрової трансформації будівельної галузі. Це включає у себе впровадження "розумних" систем управління будинками (Smart Building Systems), інтеграцію з Internet of Things (IoT) та важливість дотримання сучасних європейських та міжнародних стандартів щодо енергоефективності.

Ключові слова: енергоефективність, штучний інтелект, енергомоделювання, DEA, BIM, життєвий цикл, LCA, дистанційне зондування.

Вступ

Енергозбереження у будівництві вважають одним із важливих аспектів у контексті сталості міського планування з точки зору екологічності та економічності. Покращення енергоефективності у будинках грають значущу роль у досягненні цілей сталого розвитку, зменшенні викидів парникових газів та забезпеченню енергетичною безпекою. З урахуванням зростання вимог до зниження споживання енергії та викидів CO₂, появляються потреби у використанні комплексних підходів до оцінки енергетичних характеристик будинків.

Аналіз останніх досліджень. У контексті глобального сталого розвитку будівлі розглядаються як значне джерело споживання енергії, що підкреслює важливість застосування новаторських стратегій для покращення ефективності й зменшення негативного впливу на природне середовище. Дані дослідження аналізують великий потік необроблених даних про будівельну інфраструктуру з метою виявлення моделей енергоспоживання та розробки стратегій для оптимізації використання

ресурсів. Вони показують значний прогрес у використанні цифрових технологій, штучного інтелекту та комплексних підходів. Наприклад, штучні нейронні мережі для фізичного моделювання показують високу точність при розрахунках теплових втрат [1]. Комерційна програма AI BrainBox вказувала на фактичне зменшення енергоспоживання систем опалення і кондиціонування повітря на 15,8% [2]. Використання цифрових двійників на основі BIM дозволяють реалізовувати моделювання енергетичної поведінки у реальному часі [3].

Метою даної роботи є розгляд сучасних наукових підходів до оцінки енергоефективності будівель, включаючи математичне моделювання, застосування штучного інтелекту, методи аналізу ефективності, дистанційне зондування, а також інтеграція технологій BIM та аналіз життєвого циклу.

Матеріали та методи

Методи аналізу ефективності (DEA). Аналіз результативності використання енергетичних ресурсів у будівлях за допомогою методу аналізу зв'язку із виробництвом (DEA) дозволяє проводити порівняльний аналіз. Цей підхід базується на створенні «еталонної» межі ефективності та визначенні об'єктів, для яких є потенціал для покращення [4].

Це один з найпоширеніших способів нефінансового аналізу ефективності. Використовується для порівняння ефективності однорідних об'єктів (наприклад будинків або підприємств), якими використовуються різні ресурси для досягнення конкретних результатів.

У сфері енергоефективності будівель метод DEA дозволяє оцінити ефективність використання енергетичних ресурсів кожною будівлею для досягнення визначених цілей (наприклад: забезпечення комфортною температурою у приміщеннях і освітленням).

DEA - це математичний метод з нелінійною природою, який порівнюватиме об'єкти (у даному випадку будівлі), які мають схожі характеристики. Цей метод не вимагає попереднього визначення вагових коефіцієнтів для ресурсів та результатів; натомість використовуються дані самих об'єктів для створення меж ефективності.

Основні елементи DEA:

- вхідні дані включають в себе витрати на енергію (електроенергія, тепло), площу будівлі та кількість працівників або відвідувачів та інше;
- вихідні параметри це рівень комфорту, кількість наданих послуг, освітленість, температура повітря, CO₂-нейтральність тощо;
- межа ефективності - це "еталонна крива", яка встановлює найкращі об'єкти в дослідженні даного набору даних. Щоб оцінити свою

можливу покращену ефективність, інші об'єкти порівнюються з цим показником.

Енергетичне моделювання. Моделювання енергоспоживання в будівництві може бути проведене за допомогою програмних засобів типу EnergyPlus, DesignBuilder або IES VE для динамічного аналізу енергоефективності будівельних об'єктів. Ці моделі враховують параметри архітектурної геометрії споруди, використані матеріали і кліматичні умови [5].

Енергетичне моделювання включає в себе процес створення цифрової симуляції (моделі) будівлі з метою аналізу її енергоспоживання та ефективності функціонування інженерних систем. За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення можна передбачати, як будівля реагуватиме на зміну кліматичних умов, навантажень, режимів експлуатації та інженерних рішень.

Метою енергетичного моделювання є оцінка кількості спожитої енергії для визначення ефективності систем опалення та кондиціонування повітря та оптимізація використання енергетичних ресурсів і створення моделей користувацьких сценаріїв поведінки.

Моделі беруть до уваги:

- архітектурне планування будівлі (кількість поверхів та приміщень, розташування вікон та орієнтація будинку по відношенню до сонця);
- властивості теплофізики будівельних матеріалів;
- зовнішні погодні умови (сонячна радіація, температура, вологість, вітер);
- аналіз поведінки користувачів включаючи графіки активності та використання освітлення та обладнання.

Машинне навчання та штучний інтелект охоплюють різноманітні алгоритми: від Random Forest та Lasso Regression до XGBoost та нейронних мереж. Ці методи ефективно передбачають витрати енергії на основі об'ємних даних та корисні для вивчення складних нелінійних зв'язків [6].

Вивчення факторів впливу на енергоефективність та зменшення витрат у будівлях можливо за допомогою моделей Lasso Regression, Decision Tree та Random Forest для точного передбачення використання енергії. Дослідження глибоко аналізує щодо чинників впливу на споживання енергії у будинках і фокусу на первинне паливо та електроенергію і потенціал для значних заощаджень коштів і переваг для довкілля. Це дослідження надасть цінну базу для зацікавлених сторін у галузях з метою впровадження більш чистих та сталих практик у сфері енергетики.

Дистанційне зондування та геоаналітика. Сучасні методи визначення енергоефективності будівель потребують фактичного виходу сертифікованих енергоаудиторів на майданчик - цей процес є повільним, дорогим і обмеженим географічно. Для швидкого визначення перспективних цілей модернізації можна оцінювати енергоефективність

будівель лише за доступною публічною інформацією щодо дистанційного зондування - зокрема за даними аерофотозйомки чи супутникових даних стосовно температури Землі (LST).

Прилади дистанційного зондування – такі як дані від супутників та аерофотозйомка – дозволяють оцінювати енергоефективність на рівні міста чи району без необхідності фактичного доступу до будинків [7].

Оцінка життя циклу (LCA). Цей аналіз є інструментом для визначення загального впливу продукту чи процесу на навколишнє довкілля. Він охоплює весь процес створення продукту - від джерел походження матеріалів до кінцевої утилізації.

Дослідження життєвого циклу продукту вимагає детального переліку ресурсів та матеріалів, що їх потребуватимуть на всіх етапах створення продукту або послуги і оцінки викидів у природне середовище.

Методологія LCA дозволяє оцінити енергоефективність будинку, враховуючи всі етапи його життя: від видобутку сировини до використання. Це допомагає отримати більш повне оцінювання з екологічною складовою [8, 9].

BIM-аналітика. Аналіз BIM (будівельне моделювання інформаційною моделлю) у поєднанні з енергетичними симуляторами дозволяє проводити моделювання енергетичної поведінки будинку ще на етапі проектування, сприяючи вибору оптимальних проектних рішень.

BIM - це не просто інструмент для підвищення енергоефективності; це комплексна система, що сприяє загальній стійкості будівельних проектів. Його здатність працювати з величезними обсягами інформації та інтегруватися з іншими технологіями робить його важливим активом у прагненні до більш екологічних підходів до будівництва. Повноцінне використання можливостей BIM дозволяє будівельному сектору досягти значних успіхів у зменшенні негативного впливу на навколишнє середовище та сприяти сталому майбутньому заощаджуючи електроенергію та моделюючи енергетичний режим за допомогою програм (EnergyPlus Open Studio) [10, 11].

Інтеграція Інтернету речей та аналізу великих даних. Використання пристроїв Інтернету речей для постійного збору даних про мікроклімат та споживання енергії, використання технологій великих даних для аналізу та передбачення енергоефективності [12, 13].

Використання комплексних критеріїв оцінки. Перехід від аналізу теплотехнічних показників до комплексного аналізу за багатьма факторами включаючи оцінку використання первинної енергії, вуглецевого сліду та життєвого циклу матеріалів [14, 15].

Орієнтованість на нульове чи позитивне використання енергії. Популяризація стандартів NZEB (практично нульових енергетичних будинків) та концепцій “позитивної енергії будинків”, де будівлі виробляють більше енергії ніж споживають [16, 17].

Аналіз теплового комфорту та адаптивності. Дослідження забезпечення комфорту від тепла та адаптивності будинків до змін кліматичних умов включають в себе оцінку рівня комфорту користувачів (PMV / PPD), а також аналіз пристосованості будинків до нових умов [18, 19].

Інноваційні методи енергоаудиту. Інноваційні підходи до енергоаудиту включають застосування безпілотних літальних апаратів (дронів) для тепловізійного обстеження, використання 3D-сканування та створення цифрових моделей будівель [20, 21].

Еволюція систем сертифікації. Еволюція процесу сертифікаційних систем привела до появи нових стандартів (WELL, EDGE, GRES B), які охоплюють аспекти сталого розвитку, енергоефективності та здоров'я користувачів [22–24].

Висновки

Підвищення енергоефективності в будівництві є багатогранним завданням, що вимагає інтеграції інноваційних технологій, новітніх матеріалів та наукових підходів. Використання штучного інтелекту, сучасних методів оцінки енергоефективності дозволяє створювати будівлі, які не лише зменшують споживання енергії, але й сприяють збереженню навколишнього середовища. Подальші дослідження та впровадження цих інновацій є ключовими для досягнення цілей сталого розвитку та енергетичної безпеки.

Сучасні наукові методи оцінки енергоефективності будівель дозволяють не лише проводити глибокий аналіз, а й оптимізувати процеси проєктування та експлуатації. У поєднанні із цифровими технологіями, ці підходи відкривають нові горизонти для сталого розвитку будівельної галузі.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Література

1. Jiang Z., Wu L., Sun H., et al. Physics-Informed Neural Networks for Thermal Loss Estimation in Buildings. *arXiv preprint arXiv:2311.08035*. 2023. Available at: <https://arxiv.org/abs/2311.08035>
2. BrainBox AI. AI-Powered HVAC Efficiency Results [Electronic resource]. *Time Magazine*. 2024. Available at: <https://time.com/7201501/ai-buildings-energy-efficiency>
3. Neri R., Mastrolembo Ventura S., Arnone G. Digital Twins for Energy Optimization in BIM Environments. *arXiv preprint arXiv:2305.04498*. 2023. Available at: <https://arxiv.org/abs/2305.04498>
4. Charnes A., Cooper W. W., Rhodes E. Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, 1978. Vol. 2, No. 6. P. 429–444.
5. EnergyPlus Energy Simulation Software [Electronic resource]. *U.S. Department of Energy*. Access mode: <https://energyplus.net>
6. Ahmad T., Chen H. Machine learning-based building energy consumption prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019. Vol. 100. P. 127–134.
7. Weng Q. Remote Sensing of Impervious Surfaces. *Boca Raton: CRC Press*, 2012. 441 p.
8. Cabeza L. F., Rincón L., Vilariño V., Pérez G., Castell A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 29. P. 394–416.
9. Azhar S., Brown J., Farooqui R. BIM-based sustainability analysis: An evaluation of building performance analysis software. *Proceedings of the 45th ASC Annual Conference*. Gainesville, FL, 2009. P. 1–8.
10. Eastman, C. M., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling*. Wiley.
11. Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4), 661–673.
12. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660.
13. Marjani, M., et al. (2017). Big IoT Data Analytics: Architecture, Opportunities, and Open Research Challenges. *IEEE Access*, 5, 5247–5261.
14. Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Energy Analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416.
15. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
16. European Parliament. (2010). Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings (recast).

17. Marszal, A. J., & Heiselberg, P. (2009). A literature review of Zero Energy Buildings (ZEB) definitions. *Applied Energy*, 89(2), 551–568.
18. Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. McGraw-Hill.
19. Nicol, F., & Humphreys, M. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563–572.
20. Sankaran, S., et al. (2019). Thermal Imaging Drones for Energy Auditing of Buildings. *Remote Sensing*, 11(8), 939.
21. Lu, Y., et al. (2020). Digital Twin-driven Smart Manufacturing: Connotation, Reference Model, Applications and Research Issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837.
22. International WELL Building Institute. (2020). *The WELL Building Standard v2*.
23. International Finance Corporation (IFC). (2018). *EDGE: An Innovation of IFC — Green Buildings for Emerging Markets*.
24. GRESB. (2021). *GRESB Real Estate Assessment Reference Guide*.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 06.05.2025	Received 06.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято	Accepted
Опубліковано	Published

N. V. Komenda*

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5944-8665>
 Department of Electrical Engineering
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

I. V. Hrytsiuk,

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4472-306X>
 Department of Electrical Engineering
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

V. I. Volynets

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9192-2785>
 Department of Electrical Engineering
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

A. V. Hadai

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4195-7218>
 Department of Electrical Engineering
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

D. T. Komenda

PhD student
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: nykomenda@gmail.com

Scientific approaches to assessing the energy efficiency of buildings

How to Cite:

Komenda, N. V., Hrytsiuk, I. V., Volynets, V. I., Hadai, A. V., Komenda, D.T. (2025). Scientific approaches to assessing the energy efficiency of buildings. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 123-131. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-12)

Abstract. The research explores modern scientific methods for building energy efficiency assessment within present-day global sustainability frameworks. The growing need to decrease energy usage while improving indoor environmental quality makes advanced energy-saving technologies essential for adoption. The research examines new approaches to energy modeling and analysis by emphasizing mathematical modeling as an effective prediction tool for building energy performance. The method enables researchers to build precise physical models of thermal and energy processes, which allows them to include building-specific architectural features and climatic conditions, and operational parameters in complete energy assessments.

The main focus should be placed on artificial intelligence, together with its machine learning algorithms that operate within deep learning technologies and artificial neural networks. The system enables automatic processing of sensor and monitoring data, and remote sensing system data in large quantities. The new approach has resulted in better prediction accuracy and model adaptability to actual conditions. The research investigates contemporary methods for assessing energy efficiency through actual versus predicted consumption comparisons. The research investigates remote sensing of Earth's capabilities to detect heat losses and building defects and evaluate energy states through satellite or aerial photograph data analysis.

The research focuses on how Building Information Modeling technologies (BIM) combine with Life Cycle Assessment (LCA) methods to evaluate energy efficiency across all phases of building development, including conceptual stages, design, construction, operational use, and maintenance.

The research discusses potential advancements of these approaches in the digital transformation of the construction industry. The introduction of "smart" building management systems (Smart Building Systems) along with Internet of Things (IoT) integration and compliance with modern European and international standards for energy efficiency.

Keywords: energy efficiency, artificial intelligence, energy modeling, DEA, BIM, life cycle, LCA, remote sensing.