

Владислав ПАСТУХОВ,
аспірант кафедри промислового та цивільного будівництва

ORCID: 0009-0008-8247-6200

Свєн АРУТЮНЯН,
доктор філософії

ORCID: 0000-0002-0502-6651

Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ЯКОСТІ ТА КОНТРОЛЮ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГОЄМНИХ БУДІВЕЛЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ

У статті досліджуються можливості застосування технологій інтелектуального аналізу даних (Data Mining) для оцінювання експлуатаційної ефективності сучасних будівель, що характеризуються високою енергоємністю та інформаційною насиченістю. Розглянуто типовий набір ДМ-методів, класифіковано їх переваги й обмеження, а також обґрунтовано критерії вибору алгоритмів залежно від цілей аналізу. Особливу увагу приділено ролі великих обсягів експлуатаційних даних як джерела для виявлення прихованих закономірностей у роботі інженерних систем та пошуку можливостей підвищення енергоефективності будівель.

Підкреслено, що традиційні методи технічного нагляду й оцінювання стану будівель не завжди забезпечують оперативне виявлення потенційно небезпечних дефектів або нераціонального енергоспоживання. Складність діагностики обумовлена варіативністю конструктивних рішень, впливом зовнішніх чинників та складністю інтерпретації даних без відповідних цифрових інструментів.

У цьому контексті обґрунтовано необхідність впровадження сучасних систем інструментального контролю надійності, здатних функціонувати на всіх етапах життєвого циклу будівлі - від введення в експлуатацію до технічного обслуговування й реконструкції. Поєднання безперервного моніторингу конструктивних елементів із методами інтелектуального аналізу даних дає змогу істотно підвищити рівень безпеки та керованості об'єктів, зменшити витрати на обслуговування, а також продовжити термін їх надійної експлуатації.

Ключові слова: *інтелектуальний аналіз даних (Data Mining), експлуатаційна ефективність будівель, інструментальний контроль, надійність конструкцій, моніторинг технічного стану, енергоефективність, життєвий цикл будівлі, великі дані в будівництві, діагностика будівель, автоматизовані системи контролю.*

Постановка проблеми. Сучасні будівлі характеризуються високим рівнем енергоспоживання та складністю експлуатаційних систем, що зумовлює необхідність підвищення їх енергоефективності та надійності [3]. Забезпечення моніторингу експлуатаційної якості будівель та оперативного контролю технічного стану є ключовими завданнями для оптимізації роботи інженерних

систем і зниження витрат на експлуатацію. Впровадження систем автоматизації будівель (Building Automation Systems, BAS) створює можливості для збору великих обсягів експлуатаційних даних, що відкриває нові перспективи для застосування методів інтелектуального аналізу даних з метою покращення управління ресурсами будівель протягом усього їх життєвого циклу.

Попри наявність значних обсягів експлуатаційних даних, отриманих за допомогою BAS, їх аналітичний потенціал залишається недостатньо реалізованим. Це зумовлено відсутністю ефективних методів і інструментів для обробки та інтерпретації великих даних у сфері будівництва[2]. Традиційні підходи, які ґрунтуються на фізичних моделях, статистичних методах та інженерній експертизі, виявляються малоефективними у виявленні неочевидних закономірностей у роботі інженерних систем. У контексті підвищення експлуатаційної якості та енергоефективності будівель виникає об'єктивна потреба у впровадженні сучасних методів аналізу даних, здатних забезпечити виявлення прихованих дефектів, прогнозування відмов обладнання та оптимізацію функціонування систем управління.

DM-технології застосовуються у різних галузях промисловості. У загальному вигляді DM-техніки поділяються на методи навчання під наглядом (supervised learning) та без нагляду (unsupervised learning) [3].

У статті представлено результати дослідження, присвяченого застосуванню технологій інтелектуального аналізу даних (Data Mining) для обробки великих обсягів експлуатаційної інформації, отриманої в межах системи моніторингу технічного стану та експлуатаційної якості будівель. Основною метою є виявлення прихованих закономірностей у функціонуванні інженерних систем, які можуть бути використані для підвищення енергоефективності, оптимізації керування ресурсами та забезпечення надійності будівель протягом усього їх життєвого циклу. Методологічна основа дослідження ґрунтується на загальній концепції аналітики даних і передбачає використання дерев рішень та методів виявлення асоціативних правил. Результати підтверджують доцільність впровадження Data Mining у практику експлуатаційного моніторингу, що дозволяє підвищити рівень безпеки будівель, зменшити витрати на обслуговування та продовжити термін їх надійної експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження у сфері застосування інтелектуального аналізу даних (Data Mining, DM) для підвищення енергоефективності та експлуатаційної якості будівель демонструють значний прогрес у використанні штучного інтелекту (ШІ), цифрових двійників та методів машинного навчання [1,4]. Ці підходи сприяють оптимізації енергоспоживання, виявленню аномалій та прогнозуванню технічного стану будівель.

Огляд публікацій, присвячених застосуванню технологій інтелектуального аналізу даних (Data Mining, DM) у сфері моніторингу та підвищення експлуатаційної ефективності будівель, свідчить про зростаючий інтерес до цієї проблематики як у світовій, так і у вітчизняній науковій спільноті. У закордонних дослідженнях значна увага приділяється використанню великих обсягів експлуатаційних даних, що накопичуються в системах автоматизації будівель (BAS), для виявлення закономірностей, аномалій, дефектів обладнання та неефективних режимів роботи інженерних систем. Як зазначають, зокрема, Shen et al. (2020) та Yu et al. (2019), застосування методів класифікації, кластеризації,

аналізу асоціацій і дерев рішень уможлиблює виявлення прихованих знань, які не можуть бути отримані традиційними методами інженерного аналізу. DM-технології демонструють високу ефективність у задачах прогнозування споживання енергії, діагностики несправностей, оптимізації режимів роботи систем ОВК (опалення, вентиляції та кондиціонування) та підвищення загальної енергоефективності будівель.

Вітчизняні дослідження, попри відносно невелику кількість спеціалізованих робіт, поступово формують методологічне підґрунтя для впровадження подібних підходів. У публікаціях Калашнікової К.Ю. [1] та Бондаренка Д.Ю. [2] підкреслюється необхідність цифровізації будівельної галузі України, включно з інтеграцією систем моніторингу та збору експлуатаційних даних як основи для аналітики. У наукових збірниках Херсонського державного аграрно-економічного університету, а також Київського національного університету будівництва і архітектури розглядаються питання енергоефективності, надійності конструкцій та впровадження інноваційних цифрових технологій у процеси проєктування й експлуатації будівель. Окрему увагу слід приділити навчальним посібникам і методичним матеріалам [3], які окреслюють базові принципи інтелектуального аналізу даних і можуть бути адаптовані для розв'язання задач у сфері моніторингу будівель.

Таким чином, аналіз актуальних публікацій засвідчує наявність активних наукових пошуків у напрямі використання технологій Data Mining у будівництві. Зарубіжний досвід демонструє зрілі практики впровадження DM-алгоритмів для управління експлуатаційною ефективністю, тоді як вітчизняна наука зосереджується на створенні концептуальних моделей і формуванні методичної бази для майбутніх практичних реалізацій. Це створює перспективне підґрунтя для розвитку комплексних систем моніторингу експлуатаційної якості будівель із використанням інтелектуального аналізу даних [2,4].

Актуальність і новизна. Актуальність теми зумовлена зростанням енергоємності сучасних будівель, потребою в підвищенні їх експлуатаційної надійності, а також активним впровадженням цифрових технологій у будівельну галузь[4]. Традиційні методи технічного контролю вже не відповідають вимогам сучасного управління станом об'єктів, особливо в умовах накопичення великих обсягів експлуатаційних даних. У цьому контексті технології інтелектуального аналізу даних (Data Mining) [5] відкривають нові можливості для виявлення прихованих закономірностей, прогнозування несправностей та оптимізації енергоспоживання, що робить їх надзвичайно перспективними для забезпечення ефективного моніторингу та керування будівлями протягом усього життєвого циклу.

Мета і методи досліджень полягає у формуванні методологічних засад застосування технологій інтелектуального аналізу даних (Data Mining) для підвищення експлуатаційної ефективності та надійності сучасних енергоємних будівель шляхом виявлення прихованих закономірностей у великих масивах експлуатаційної інформації, що генеруються в процесі їх функціонування [2,4].

Методи дослідження, використані в роботі, включають: аналіз наукової літератури та огляд сучасних вітчизняних і зарубіжних публікацій з тематики моніторингу будівель і застосування DM-алгоритмів; побудову загального аналітичного фреймворку для обробки експлуатаційних даних; використання

методів класифікації (дерева рішень) та асоціативного аналізу (алгоритмів пошуку правил асоціації) [6] для виявлення типових шаблонів у поведінці інженерних систем; систематизацію результатів аналізу для формування рекомендацій щодо покращення енергоменеджменту та інструментального контролю якості експлуатації будівель.

Виклад основного матеріалу. У межах дослідження було реалізовано аналітичну модель обробки експлуатаційних даних енергоємної будівлі з використанням методів інтелектуального аналізу даних [7]. Джерелом даних стала система автоматизованого моніторингу, яка забезпечує постійний збір інформації щодо роботи інженерного обладнання, параметрів мікроклімату та технічного стану будівельних конструкцій.

Аналіз було проведено у кілька етапів. На першому етапі здійснено попередню обробку даних: очищення від аномалій, уніфікацію форматів, нормалізацію параметрів. На другому етапі було застосовано методи класифікації (дерева рішень) для виявлення факторів, що найбільше впливають на перевищення нормативного енергоспоживання. У результаті було ідентифіковано такі ключові впливові змінні: зовнішня температура, режим роботи вентиляційного обладнання, щільність внутрішнього навантаження та тривалість пікового навантаження.

Попередній аналіз технічного стану будівлі виявив:

- понад 30% інженерних вузлів мають середній або високий ступінь зношеності;
- частота аварійних спрацьовувань систем вентиляції становить 4,5 випадків/місяць;
- перевищення допустимих рівнів вологості зафіксовано у 18% приміщень протягом опалювального періоду;
- тепловтрати через огорожувальні конструкції перевищують норматив на 12–15%;
- середній термін служби основного обладнання (теплопункт, вентиляційні установки) перевищує 20 років, що свідчить про необхідність технічного переоснащення.

На третьому етапі застосовано алгоритм асоціативних правил, за допомогою якого встановлено критичні сценарії: наприклад, наявність зниженого температурного режиму у поєднанні з нерегламентованою роботою вентиляції та зниженою теплоефективністю стін у 90% випадків призводить до зростання споживання енергії на 20–25%.

Обговорення отриманих результатів засвідчує високий потенціал використання технологій інтелектуального аналізу даних у практиці експлуатації енергоємних будівель. Виявлені закономірності дозволяють не лише виявляти неефективні сценарії роботи інженерних систем, а й формувати практичні рекомендації щодо оптимізації керування. Такі рішення можуть бути реалізовані у вигляді адаптивних алгоритмів в рамках BAS, що забезпечить підвищення енергоефективності об'єктів без додаткових витрат на модернізацію обладнання.

Крім того, результати дослідження свідчать про доцільність використання методів Data Mining для прогностичної діагностики потенційних несправностей. Результати демонструють потенціал використання інтелектуального аналізу даних не лише для поточного моніторингу, а й для довгострокового прогнозування

технічного стану будівельних систем, що забезпечує підвищення їх експлуатаційної якості та зниження ризику аварійних ситуацій. Це, у свою чергу, сприяє продовженню строку експлуатації будівлі та зниженню витрат на її обслуговування.

Модель дерева прийняття рішень слід будувати на основі моніторингових даних будівлі, для аналізу були взяті дані споживання електроенергії будівлі за 1 календарний рік. На початковому етапі слід обрати місяць, години споживання, день тижня – усі ці дані приймаємо за змінні величини. Такі показники, наприклад, як кількість мешканців у будинку – не враховується оскільки час і тип дня визначають, як люди використовують приміщення.

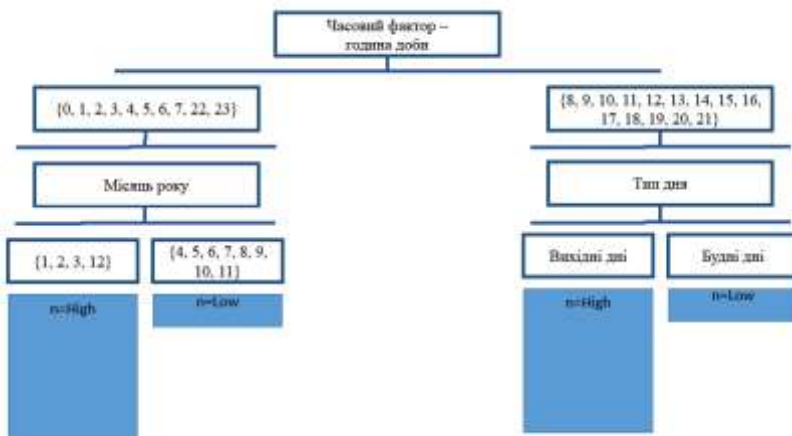


Рис. 1. Модель дерева прийняття рішень будівлі (за усередненими показниками споживання електроенергії)

Побудована модель дерева рішень передбачає поділ даних на основі змістовно обґрунтованих критеріїв. Початкове розгалуження (вузол 1) здійснюється за часовим фактором - годиною доби. Модель виокремлює дві групи: перша охоплює години {0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 22, 23}, що відповідають непіковим періодам доби, а друга - години з 8:00 до 21:00, які охоплюють активні (пікові) години. Це цілком узгоджується з фактичним графіком експлуатації будівлі, де навчальні заняття зазвичай тривають з 8:30 до 21:30.

Наступне розгалуження (вузол 2) відбувається за місяцями року: місяці {1, 2, 3, 12} відповідають прохолодному та менш вологому сезону, тоді як місяці з квітня по листопад (включно) {4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11} характеризуються високими температурами.

У вузлі 4 як критерій поділу використано тип дня - будні або вихідні. Такий підхід дозволяє відобразити різну поведінку користувачів будівлі у робочі та вихідні дні.

На основі визначених розгалужень у вузлах 1, 2 та 5 модель формує не чотири, а вісім груп даних, що забезпечує точніше представлення закономірностей споживання електроенергії. Аналіз його розмаху демонструє, що для кожної групи характерний власний розподіл споживання електроенергії, особливо у пікові години. Наприклад, у межах одного сезону (холодного чи теплого) споживання електроенергії у непікові години на буднях і вихідних практично не відрізняється, що видно на прикладі груп 1 і 3 або 5 і 7.

Особливої уваги заслуговує схожість показників у групах 4, 5 та 7, що вказує на подібність споживання електроенергії у пікові години вихідних днів прохолодного сезону та у непікові години теплового сезону. Традиційні підходи можуть об'єднувати такі випадки в одну групу, втрачаючи нюанси. Натомість метод дерева рішень забезпечує більш гнучке та структурно чітке розмежування, сприяючи точнішому виявленню закономірностей і підвищуючи достовірність отриманих результатів.

Приведена модель дерева рішень дозволяє ефективно структурувати дані, надаючи чіткі орієнтири для їх класифікації. Замість звичайного поділу на чотири групи за кінцевими вузлами, було використано правила розподілу, сформовані на ключових етапах поділу у вузлах 1, 2 та 5. Це дало змогу розділити весь масив даних на вісім окремих груп. Результати вказують на те, що у різних групах споживання суттєво відрізняється, особливо у пікові години. Водночас у непікові години споживання у будні та вихідні дні в межах одного сезону (прохолодного або теплового) має подібні характеристики. Цікаво, що у групах 4, 5 та 7 виявлено схожі патерни, що свідчить про подібність між споживанням електроенергії у години пік на вихідних у прохолодну пору року та у непікові години в теплу пору. У той час як традиційні методи аналізу могли б об'єднати подібні спостереження в одну групу [8], модель дерева рішень дозволяє точніше виявляти відмінності між ними. Це значно підвищує чутливість аналізу та достовірність виявлених закономірностей.

Висновки та рекомендації подальшого дослідження.

Застосування технологій інтелектуального аналізу даних у сфері експлуатації будівель дозволяє суттєво підвищити ефективність управління інженерними системами та забезпечити надійність будівель протягом усього їх життєвого циклу. В умовах зростання енергоспоживання та складності експлуатаційних процесів традиційні методи аналізу виявляються недостатньо ефективними, оскільки не здатні виявляти приховані закономірності та прогнозувати критичні ситуації. Впровадження систем автоматизації будівель створює сприятливі умови для збору великих обсягів даних, однак їх потенціал залишається нереалізованим без використання сучасних DM-методів, таких як дерева рішень і виявлення асоціативних правил. Проведене дослідження підтверджує, що Data Mining може стати дієвим інструментом у системах моніторингу, сприяючи виявленню прихованих дефектів, підвищенню енергоефективності, зниженню витрат на обслуговування та загальному поліпшенню експлуатаційної якості будівель.

Список літератури:

1. Калашнікова К.Ю., Бондаренко Д.Ю. Цифровізація будівельної галузі України: аналіз стану, проблеми та перспективи. *Економіка і суспільство*. 2024. Вип. 65. С. 64-58.

2. Інтелектуальні конструкції та інноваційні будівельні матеріали: збірник наукових праць. 5-й випуск. Кропивницький. Херсон: ХДАЕУ, 2024. 123 с.
3. Сергеев-Горчинський О.О., Іщенко Г.В. Інтелектуальний аналіз даних: Комп'ютерний практикум: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 73 с.
4. Енергоефективність в будівництві та архітектурі: науково-технічний збірник. Випуск 7. Відповідальний редактор П. М. Куліков. Київ: КНУБА, 2015 р. 404 с.
5. Цифровізація будівельної галузі. URL: <https://dedalsoft.com.ua/blog/tsifrovizatsiya-budivelni-galuzi>
6. Bousfield, Liam, Tokbolat, Serik and Demian, Peter. "11 Evaluating the current state of digitalisation of the UK construction industry". *Data-Centric Structural Health Monitoring: Mechanical, Aerospace and Complex Infrastructure Systems*, edited by Mohammad Noori, Fuh-Gwo Yuan and Ehsan Noroozinejad Farsangi, Berlin, Boston: De Gruyter, 2023, pp. 237-258. <https://doi.org/10.1515/9783110791426-011>
7. Блінова Г.О. Впровадження єдиної державної електронної системи у сфері будівництва як етап модернізації електронного урядування в Україні. В монографії «Стратегія сучасного розвитку України: синтез правових, освітніх та економічних механізмів», Чернігів: ГО «Науково-освітній інноваційний центр суспільних трансформацій», 2022. С. 85 –100. DOI: 10.54929/monograph-12-2022-02-02.
8. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. [Чинний від 2017-04-01]. К.: Мінрегіонбуд України, 2016. 34 с.

References:

1. Kalashnikova, K., Bondarenko, D. (2024). *Digitalization of the Construction industry in Ukraine: analysis of the state, problems and development prospects. Economy and Society*, (65). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-65-2>.
2. *Intelligent Structures and Innovative Construction Technologies (2024)*. Collection of Scientific Papers, Issue 5. 123 p.
3. Sergeyev-Horchynskiy, O.O., Ishchenko, H.V. (2015). *Data Mining: Computer Workshop: a textbook*. Kyiv: KPI. 73 p.
4. *Energy Efficiency in Construction and Architecture (2015)*. Collection of Scientific Papers. Issue 7. Kyiv: KNUCA. 404 p.
5. *Digitalization of the Construction Industry*. URL: <https://dedalsoft.com.ua/blog/tsifrovizatsiya-budivelni-galuzi>
6. Bousfield, L., Tokbolat, S., Demian, P. (2023). "11 Evaluating the current state of digitalisation of the UK construction industry". *Data-Centric Structural Health Monitoring: Mechanical, Aerospace and Complex Infrastructure Systems*, edited by Mohammad Noori, Fuh-Gwo Yuan and Ehsan Noroozinejad Farsangi, Berlin, Boston: De Gruyter, pp. 237-258. <https://doi.org/10.1515/9783110791426-011>
7. Blinova, H.O. (2022). *Implementation of the Unified State Electronic System in the Construction Sector as a Stage in the Modernization of E-Governance in Ukraine*. In the monograph "Strategy of Modern Development of Ukraine: Synthesis of Legal, Educational and Economic Mechanisms", Chernihiv: NGO "Scientific and Educational Innovation Center for Social Transformations", pp. 85–100. DOI: 10.54929/monograph-12-2022-02-02

8. DSTU-N B V.1.2-18:2016. *Guidelines for the Inspection of Buildings and Structures to Determine and Assess Their Technical Condition*. Minrehionbud Ukrainy

Vladyslav PASTUHOV, Yevhen ARUTIUNIAN

Methods for improving the operational quality and reliability control of energy-consumptive buildings using intellectual data analysis

The article explores the possibilities of using intelligent data analysis technologies (Data Mining) to assess the operational efficiency of modern buildings characterized by high energy consumption and information saturation. A typical set of DM methods is considered, their advantages and limitations are classified, and the criteria for choosing algorithms depending on the analysis objectives are substantiated. Particular attention is paid to the role of large volumes of operational data as a source for identifying hidden patterns in the operation of engineering systems and finding opportunities to improve the energy efficiency of buildings.

It is emphasized that traditional methods of technical supervision and assessment of the condition of buildings do not always provide for the prompt detection of potentially dangerous defects or irrational energy consumption. The complexity of diagnostics is due to the variability of design solutions, the influence of external factors and the complexity of interpreting data without appropriate digital tools.

In this context, the need to implement modern instrumental reliability control systems capable of functioning at all stages of the building life cycle - from commissioning to maintenance and reconstruction is substantiated. The combination of continuous monitoring of structural elements with methods of intelligent data analysis makes it possible to significantly increase the level of safety and manageability of objects, reduce maintenance costs, and extend the period of their reliable operation.

Keywords: *intelligent data analysis (Data Mining), operational efficiency of buildings, instrumental control, structural reliability, technical condition monitoring, energy efficiency, building life cycle, big data in construction, building diagnostics, automated control systems.*