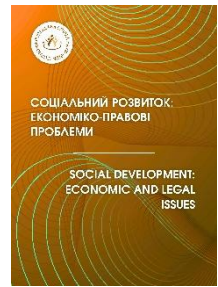




e-ISSN 3083-6018

СОЦІАЛЬНИЙ РОЗВИТОК: економіко-правові проблеми

<https://www.eu-scientists.com/index.php/sdel>



Математичне моделювання енергетичної ефективності підприємств на основі фізичних принципів і штучного інтелекту

Роман І. Витвицький ¹ * ● Ольга В. Морушко ² ●

Віктор М. Мосюрчак ³ ● Ірина М. Скобель ⁴ ● Роман М. Морушко ⁵

¹ Фаховий коледж ЗВО «Університет Короля Данила» (Україна). Викладач коледжу.

² ЗВО «Університет Короля Данила» (Україна). Доцент кафедри інформаційних технологій, канд. фіз.-мат. наук.

³ Фаховий коледж ЗВО «Університет Короля Данила» (Україна). Викладач математики та комп'ютерних дисциплін, спеціаліст вищої категорії, викладач-методист.

⁴ Фаховий коледж ЗВО «Університет Короля Данила» (Україна). Викладач математики, спеціаліст вищої категорії.

⁵ ЗВО «Університет Короля Данила» (Україна). Аспірант кафедри управління та адміністрування.

* Автор-кореспондент, e-mail: roman.vytytskyi@ukd.edu.ua

СТАТТЯ

АНОТАЦІЯ

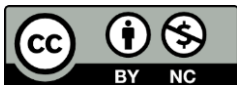
Дослідницька

DOI:

[10.70651/3083-6018/2025.4.24](https://doi.org/10.70651/3083-6018/2025.4.24)

Авторське право

© 2025 авторів



Цей твір
ліцензовано на
умовах Ліцензії
Creative Commons
«Із Зазначенням
Авторства –
Некомерційна 4.0
Міжнародна»
(CC BY-NC 4.0).



Стаття присвячена дослідженню процесів математичного моделювання енергетичної ефективності виробничих підприємств із урахуванням фізичних принципів і сучасних підходів штучного інтелекту. Мета дослідження – проаналізувати можливості застосування математичного моделювання для підвищення енергетичної ефективності підприємств за допомогою технологій штучного інтелекту в умовах динамічного виробничого середовища. Результати дослідження показують, що математичне моделювання є важливим інструментом у сфері енергоменеджменту підприємств, особливо в умовах зростання виробничих потужностей та обмеженості ресурсів. Зроблено акцент на комплексному підході до управління енергоспоживанням, що враховує як внутрішні технічні характеристики підприємства, так і вплив зовнішніх чинників. Показано, що впровадження штучного інтелекту в математичні моделі дозволяє значно підвищити точність прогнозів, забезпечити адаптивне управління ресурсами та швидке реагування на зміну умов виробництва. Досліджено, що основою ефективного енергоменеджменту є безперервний збір, обробка та аналіз даних про енергоспоживання. Установлено, що використання математичних моделей, доповнених інтелектуальними алгоритмами, дає змогу враховувати широкий спектр параметрів, серед яких технологічні, метеорологічні, економічні та сезонні показники. Це створює підґрунтя для оптимізації енергетичних потоків та стабілізації роботи підприємств за умов змінного виробничого навантаження. Показано, що, попри високий рівень автоматизації, ключову роль відіграє людський фактор. Надійне функціонування інтелектуальних систем управління енергоефективністю можливе лише за умови постійного контролю з боку кваліфікованого персоналу, здатного оцінити адекватність запропонованих рішень та коригувати їх відповідно до цільових показників. Практичне значення дослідження полягає у створенні ефективної основи для впровадження енергоефективних рішень на підприємствах шляхом інтеграції математичного моделювання, штучного інтелекту та експертного контролю.

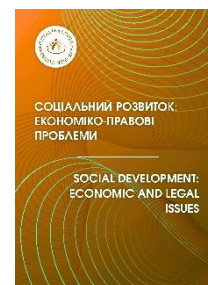
КЛЮЧОВІ СЛОВА

енергоефективність, математичне моделювання, виробництво, штучний інтелект, енергоменеджмент.



e-ISSN 3083-6018

SOCIAL DEVELOPMENT: Economic and Legal Issues

<https://www.eu-scientists.com/index.php/sdel>


Mathematical Modeling of Energy Efficiency in Enterprises Based on Physical Principles and Artificial Intelligence

Roman Vytvytskyi ^{1*} ● Olha Morushko ² ●Viktor Mosiurchak ³ ● Iryna Skobel ⁴ ● Roman Morushko ⁵¹ Professional College of King Danylo University (Ukraine). College Lecturer.² King Danylo University (Ukraine). Associate Professor at the Department of Information Technologies, PhD in Physical and Mathematical Science.³ Professional College of King Danylo University (Ukraine). Lecturer of Mathematics and Computer Disciplines, Specialist of Highest Category, Lecturer-Methodologist.⁴ Professional College of King Danylo University (Ukraine). Lecturer of Mathematics, Specialist of Highest Category.⁵ King Danylo University (Ukraine). PhD Student at the Department of Management and Administration.* **Corresponding Author**, e-mail: roman.vytvytskyi@ukd.edu.ua

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Research Article

DOI:

[10.70651/3083-6018/2025.4.24](https://doi.org/10.70651/3083-6018/2025.4.24)

Copyright © 2025
by authors



This is an open
access journal and
all published
articles are licensed
under a Creative
Commons
Attribution-
NonCommercial 4.0
International
(CC BY-NC 4.0)



The article focuses on exploring the processes of mathematical modeling of energy efficiency in manufacturing enterprises, taking into account physical principles and modern artificial intelligence approaches. The study aims to analyze the potential of mathematical modeling to improve energy efficiency in enterprises through the use of artificial intelligence technologies in a dynamic production environment. The findings demonstrate that mathematical modeling is a vital tool in enterprise energy management, especially in the context of expanding production capacity and limited resources. The emphasis is placed on a comprehensive approach to energy consumption management, which considers both internal technical characteristics of the enterprise and the influence of external factors. It has been shown that integrating artificial intelligence into mathematical models significantly enhances prediction accuracy, enables adaptive resource management, and ensures rapid response to changes in production conditions. The study reveals that effective energy management relies on continuous data collection, processing, and analysis of energy consumption. It has been established that the use of mathematical models complemented by intelligent algorithms makes it possible to consider a wide range of parameters, including technological, meteorological, economic, and seasonal indicators. This creates a solid foundation for optimizing energy flows and stabilizing enterprise operations under fluctuating production loads. Despite the high level of automation, the human factor remains essential. The reliable operation of intelligent energy efficiency management systems is only possible with continuous oversight by qualified personnel capable of assessing the adequacy of proposed solutions and adjusting them according to target indicators. The practical significance of this study lies in establishing an effective foundation for implementing energy-efficient solutions in enterprises by integrating mathematical modeling, artificial intelligence, and expert supervision.

KEYWORDS

energy efficiency, mathematical modeling, production, artificial intelligence, energy management

1. Вступ

У сучасних умовах зростання вартості енергоресурсів, посилення екологічних вимог і конкурентного тиску на підприємства, забезпечення високого рівня енергетичної ефективності є ключовим чинником ефективного господарського процесу будь-якої організації, незалежно від того, чи вона є комерційною, чи державною.

Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є використання математичного моделювання для аналізу та оптимізації енергетичних процесів на підприємствах. Традиційні підходи до математичного моделювання, що застосовуються в системах автоматизації енергозабезпечення, демонструють значний потенціал для подальшого розвитку та вдосконалення. Зокрема, інтеграція елементів штучного інтелекту в класичні моделі відкриває нові можливості для формування гнучких, адаптивних і контекстно-чутливих систем управління енергоспоживанням.

Штучний інтелект дозволяє значно покращити структуру математичних моделей, розширивши їхню параметричну базу за рахунок включення множини як внутрішніх, так і зовнішніх факторів – від технологічних характеристик виробничого процесу до метеорологічних та економічних умов. Така адаптивність моделей створює умови для побудови ефективних систем енергоменеджменту, які здатні динамічно реагувати на зміни у виробничому середовищі та забезпечувати оптимальне функціонування енергетичних систем підприємства.

Впровадження подібних аналітико-прогностичних моделей є особливо важливим у контексті глобальних викликів, пов'язаних із дефіцитом енергоносіїв, зростанням тарифів на електроенергію, необхідністю зниження витрат на виробництво та виконанням стратегій сталого розвитку. Таким чином, синергія класичного математичного моделювання та штучного інтелекту постає як ефективний інструмент підвищення енергетичної ефективності промислових підприємств.

2. Огляд літературних джерел

Питання математичного моделювання енергетичної ефективності підприємств на основі фізичних принципів і штучного інтелекту є недостатньо дослідженим у вітчизняній та зарубіжній науковій літературі. Значний внесок у розвиток теми зробили такі автори як В. І. Дешко, І. Ю. Білоус та Ю. В. Гурська [1], які у своїй роботі обґрунтували доцільність використання регресійного аналізу як базового інструменту прогнозування енергоспоживання будівель. У свою чергу, А. М. Мацуї та В. О. Кондратець [2] детально розглянули процеси математичного моделювання контролю енергоефективності в гірничо-збагачувальній галузі, зокрема в умовах зношування обладнання. В. Ф. Находов, Д. О. Іванько та А. В. Головка [3] проаналізували критерії вибору математичних методів у системах оперативного контролю, акцентуючи на гнучкості та адаптивності моделей до конкретних виробничих умов.

Особливе значення має робота О. А. Пономаря [4], яка охоплює концепцію локальних енергетичних островів і визначає математичні підходи до оцінки їхньої енергоефективності. В. Ф. Находов, О. В. Борисенко та Д. О. Іванько [5] розглядають контроль ефективності енерговикористання як ключовий елемент енергозбереження. М. А. Саницький, М. В. Котів та У. Д. Марущак [6] зосередилися на моделюванні енергоефективності в будівельному секторі, де просторово-часові параметри відіграють важливу роль.

Для дослідження використовувалася і експертна література, зокрема сучасні публікації онлайн-видань: аналітична доповідь про застосування штучного інтелекту в енергетиці О. М. Суходолі на сайті niss.gov.ua [7], платформа управління енергоресурсами digitar.com.ua [8], а також зарубіжні джерела – дослідження К. Boodhoo про предиктивне моделювання для сталих енергетичних систем [9] та G. Kyriakarakos щодо ролі ШІ у енергетичному переході [10]. Не менш важливою є робота D. Hafemeister [11], яка поєднує фізичні принципи з енергозбереженням у будівництві.

Попри достатню кількість літератури з даної теми, відчувається нестача систематизованого матеріалу з теми дослідження, а тому із використанням різних методів

наукового пізнання було проаналізовано, погруповано, систематизовано інформацію і подано у світлі теми дослідження.

3. Постановка завдання

Мета статті – показати потенціал розвитку математичного моделювання енергетичної ефективності підприємств з використанням технологій штучного інтелекту.

4. Методи та матеріали

У процесі дослідження використовувалися загальнонаукові методи аналізу, синтезу, абстрагування, узагальнення та систематизації знань, отриманих з наукових джерел і практичних матеріалів з енергоменеджменту, математичного моделювання та впровадження штучного інтелекту у виробничі системи. Методологічну основу склали принципи системного підходу до моделювання енергоспоживання, що дозволило комплексно оцінити взаємозв'язок між технічними, технологічними, економічними та зовнішніми чинниками впливу на енергетичну ефективність підприємства. Основними інформаційними джерелами виступили наукові публікації, нормативно-технічна документація, звітні дані підприємств, а також експертні оцінки фахівців у сфері енергетики та промислової автоматизації. Для обґрунтування застосування штучного інтелекту в рамках аналітико-прогностичних моделей залучено результати актуальних досліджень у галузі машинного навчання.

5. Результати та обговорення

Фізичні принципи енергоефективності – це фундаментальні закони природи, які описують поведінку енергетичних, теплових, масообмінних та інших фізичних процесів, що відбуваються в технічних і технологічних системах підприємства. До таких принципів належать закони збереження енергії (перший закон термодинаміки), збереження маси, другий закон термодинаміки, рівняння тепло- і масопереносу, закони Ньютона, Ома, Фур'є, а також інші фундаментальні співвідношення, які лежать в основі фізико-технічного моделювання [11]. Запровадження гнучкого енергетичного планування на основі фізичних принципів і автоматизованого керування дозволяє підприємствам ефективно балансувати енергоспоживання, знижувати втрати та зменшувати залежність від зовнішніх джерел. Це становить науково обґрунтовану основу для математичного моделювання енергетичної ефективності сучасних виробничих систем [8].

Використання фізичних принципів управління енергоефективністю бізнесу – є основою енергоменеджменту (EMS), що реалізує автоматизоване керування навантаженнями відповідно до фізичних характеристик енергетичних процесів. EMS координує роботу джерел енергії та споживачів, враховуючи закони збереження енергії, тепловий баланс та параметри електричних і механічних систем [5]. Його мета полягає в досягненні оптимального енергоспоживання при збереженні або підвищенні рівня технологічної ефективності виробництва. У структурі енергоменеджменту можна виділити такі основні функціональні компоненти, що забезпечують повний цикл управління енергоспоживанням:

1. Збір даних. Це перший етап, на якому здійснюється вимірювання параметрів енергоспоживання в реальному часі. До джерел даних належать лічильники електроенергії, теплотічильники, сенсори температури, тиску, витрати тощо.

2. Накопичення інформації. Зібрані дані зберігаються у відповідних базах даних або хмарних сховищах з можливістю подальшого доступу для аналітичних систем. На цьому етапі здійснюється верифікація, попередня обробка та фільтрація інформації для виключення помилок та забезпечення цілісності даних.

3. Аналіз енергоспоживання. Аналіз передбачає використання математичних методів, статистики та інструментів штучного інтелекту для виявлення аномалій, оцінки енергоефективності обладнання, порівняння з нормативами, прогнозування навантажень і споживання. Також здійснюється ідентифікація зон з найбільшими втратами або неефективним використанням енергії.

4. Планування та оптимізація. На основі результатів аналізу формується стратегія оптимізації енергоспоживання: розробляються плани модернізації, впровадження енергозберігаючих технологій, впорядковуються графіки енергоспоживання, а також оцінюється економічна ефективність впроваджуваних заходів. Моделювання майбутніх сценаріїв допомагає приймати обґрунтовані управлінські рішення.

5. Контроль і моніторинг. Ця функція забезпечує постійне спостереження за виконанням встановлених енергетичних нормативів і дотриманням заданих параметрів системи. Контроль здійснюється в автоматичному або напівавтоматичному режимі з використанням інформаційно-керуючих систем, що дозволяє оперативно реагувати на відхилення та підвищувати загальну надійність енергосистеми [11].

Основним інструментом підтримки прийняття рішень (Decision Support Tools) у системі енергоменеджменту, є метод математичного моделювання [2]. Як зазначає К. Boodhoo, математичне моделювання передбачає застосування математичних і статистичних моделей для аналізу наявних даних з метою передбачення майбутнього стану системи або процесу. Цей підхід дозволяє виявляти закономірності у поведінці систем, аналізувати тенденції та формувати прогнози, що сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень і підвищенню ефективності стратегій управління [9].

У контексті енергетики математичні моделі дозволяють враховувати:

- динаміку споживання енергії;
- вплив кліматичних факторів;
- технічний стан обладнання;
- інші важливі параметри, що визначають ефективність функціонування енергосистем.

Завдяки таким моделям стає можливим оптимальне планування використання ресурсів, оцінка потенційних ризиків і своєчасне реагування на зміни експлуатаційних умов. Такий підхід підвищує точність аналізу та прогнозування, що є критично важливим для забезпечення надійності, стабільності та стійкості енергетичної інфраструктури [9].

У сфері енергоефективності підприємств застосовуються різноманітні методи математичного моделювання, які дозволяють аналізувати, описувати та оптимізувати процеси енергоспоживання. Одним із ключових підходів є аналітичне моделювання на основі фізичних закономірностей, що передбачає використання диференціальних рівнянь, рівнянь теплопровідності, термодинаміки, гідродинаміки тощо. Стохастичні моделі дозволяють враховувати невизначеність у параметрах системи, використовуючи такі підходи, як метод Монте-Карло або марковські процеси. Імітаційне моделювання (системна динаміка, агентно-орієнтовані моделі) застосовується для відтворення поведінки складних виробничо-енергетичних систем у динаміці та в умовах змінного навантаження [3].

У наукових дослідженнях, присвячених прогнозуванню енергоспоживання, одним із найбільш поширених і практично орієнтованих підходів є регресійний аналіз. Так, В. І. Дешко, І. Ю. Білоус та Ю. В. Гурська [1], М. А. Саницький, М. В. Котів, У. Д. Марущак [6] регресійні моделі часто застосовуються для встановлення залежностей між енергоспоживанням будівель і зовнішніми або внутрішніми факторами, такими як температура зовнішнього повітря, площа приміщень, рівень зайнятості, режим експлуатації тощо. Завдяки своїй простоті, прозорості інтерпретації результатів та можливості статистичної перевірки гіпотез, регресійний аналіз є базовим інструментом у побудові прогностичних моделей енергоспоживання [1; 6].

Такі види математичного моделювання мають свої переваги і недоліки. Систематизуємо їх у табл. 1.

Окрему категорію становлять оптимізаційні методи, серед яких найбільш поширеними є лінійне, нелінійне, динамічне програмування, а також еволюційні алгоритми, які використовуються для визначення раціональних стратегій розподілу енергоресурсів. У випадках слабоформалізованих задач застосовуються експертно-логічні моделі, зокрема нечітка логіка та дерева рішень. Зі зростанням обсягів даних дедалі більшого поширення набувають методи машинного навчання, включно з нейронними мережами, методами опорних векторів і класифікаційними алгоритмами, що дають змогу будувати високоточні прогностичні моделі на основі емпіричних спостережень [3].

Упровадження штучного інтелекту (ШІ) є одним із ключових чинників трансформації сучасної енергетики, зокрема в управлінні енергоефективністю. Завдяки використанню

алгоритмів машинного навчання значно підвищується точність прогнозування попиту, виробництва та зовнішніх впливів, таких як погодні умови, що безпосередньо впливають на баланс енергосистеми. Моделі на основі штучного інтелекту дозволяють доповнювати та удосконалювати існуючі математичні моделі додатковими чинниками впливу та робити їх більш адаптивними під різні цілі і середовища.

Таблиця 1. Переваги і недоліки математичного моделювання енергетичної ефективності

Переваги	Недоліки
Висока точність прогнозування енергоспоживання завдяки використанню статистичних і математичних методів	Значна залежність точності моделі від якості та актуальності вхідних даних
Оптимізація розподілу ресурсів і режимів роботи енергетичних систем	Висока складність розробки моделей, що потребує спеціалізованих знань та ресурсів
Підвищення ефективності ресурсозбереження за рахунок адаптивного управління	Моделі не завжди враховують непередбачувані зовнішні фактори або раптові зміни в системі
Можливість оперативного планування пікових навантажень і роботи резервних потужностей в моделях гібридного типу	Обмежена універсальність моделей – необхідність адаптації під специфіку конкретного підприємства

Джерело: систематизовано авторами за даними, наведеними у [2; 4].

Крім того, інтелектуальні системи моніторингу та діагностики, побудовані з використанням ШІ, здатні виявляти відхилення у функціонуванні технічних засобів, аналізуючи сигнали з датчиків, а також прогнозувати технічні збої ще до їх фактичного виникнення. Системи управління на основі ШІ можуть автономно ухвалювати рішення щодо переключення джерел живлення, відключення несправних ділянок або залучення резервних потужностей, забезпечуючи стабільність мережі [7].

Підсиливши вираховувальні потужності засобами штучного інтелекту, такі моделі можуть бути удосконалені параметрами, що систематизовані на рис.1.

Алгоритм впровадження аналітико-прогностичних математичних моделей є доволі простим. В його основі є база попередніх даних споживання та генерування (отримання) електроенергії. З використанням автоматизованих процесів енергозабезпечення, його впровадження може виглядати у послідовності, що наведена в табл. 2.

Таблиця 2. Алгоритм впровадження аналітико-прогностичного моделювання для управління енергетичною ефективністю

Етап алгоритму	Опис дій
Визначення потреб	Ідентифікація впливів погодних умов на енергоспоживання, з урахуванням специфіки об'єкта (наприклад, заклад відпочинку, виробнича дільниця тощо)
Вибір джерел інформації	Підбір надійних джерел (API, метеослужби) для отримання погодних прогнозів, релевантних до географічного розташування об'єкта, доступ до накопичених даних про минулі споживання електроенергії
Розробка системи збору даних (парсингу)	Створення автоматизованого інструменту збору та накопичення даних для їх подальшого зіставлення. Наприклад, погодні дані передаються по API, збір даних про минулі використання може автоматизовано опрацьовуватися із використанням штучного інтелекту, що дозволяє систематизувати інформацію в єдину таблицю і працювати з нею в подальшому
Обробка та зберігання даних	Вибір ключових метеопараметрів та побудова моделей залежності для отримання найбільш оптимального джерела енергоефективності
Інтеграція аналітичної версії в систему управління	Впровадження моделі в програмне забезпечення системи енергоменеджменту для автоматизованого прийняття рішень щодо розподілу ресурсів
Побудова прогностичних моделей	Розробка математичної багатофакторної моделі, що прогнозує рівень енергоспоживання на основі різних параметрів
Тестування та валідація моделі	Перевірка точності прогнозу шляхом порівняння з фактичними даними; коригування моделі для підвищення її точності
Інтеграція прогностичної моделі в систему управління	Впровадження моделі в систему енергоуправління з метою подальшого розширення виробничих потужностей
Моніторинг ефективності	Постійне відстеження точності прогнозів та їхнього впливу на енергоспоживання; оновлення моделі за новими даними.

Джерело: розроблено авторами.

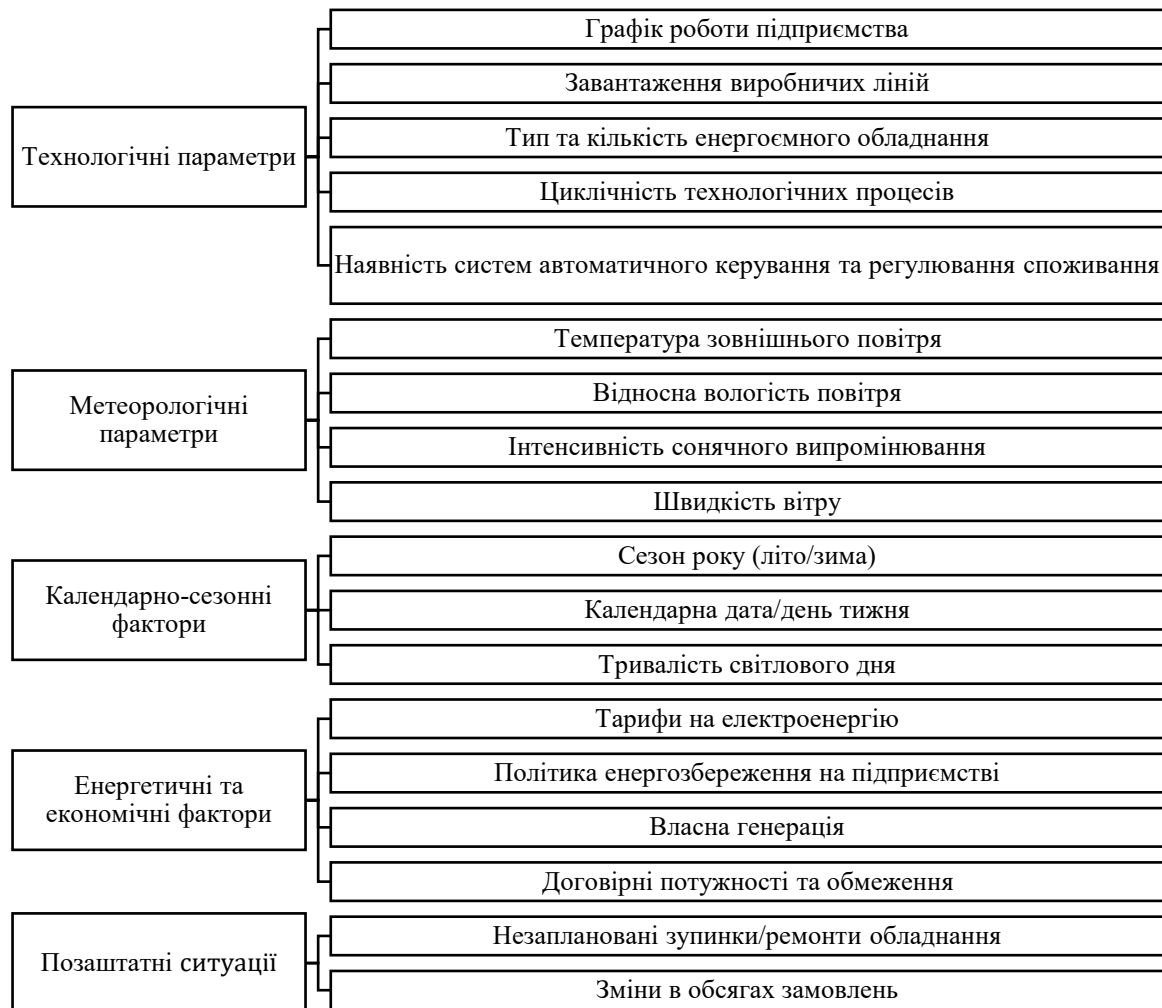


Рис.1. Класифікація параметрів для математичного моделювання ефективного енергоспоживання на виробничих підприємствах з застосуванням ШІ

Джерело: розроблено авторами.

Для ефективного впровадження автоматизованих виробничих ліній та систем аналізу і прогнозування на основі штучного інтелекту необхідною умовою є наявність кваліфікованого персоналу, який має відповідну підготовку або спеціальне навчання [10]. Такий персонал повинен володіти не лише технічними навичками роботи з програмно-апаратними комплексами, а й розумінням логіки функціонування аналітичних алгоритмів, щоб забезпечувати контроль, адаптацію та верифікацію їхніх рішень. Оскільки навіть високорівнево автоматизовані системи можуть генерувати некоректні або нераціональні сценарії дій внаслідок помилок у даних чи неврахованих зовнішніх чинників, роль людини у моніторингу, коригуванні та затвердженні таких рішень залишається критично важливою.

6. Висновки

Математичне моделювання енергетичної ефективності виробничих підприємств є актуальним інструментом в умовах зростання виробничих потужностей та обмеженості ресурсів. Його застосування дозволяє реалізувати комплексний підхід до управління енергоспоживанням, що враховує не лише технічні характеристики підприємства, а й вплив зовнішніх чинників. Інтеграція штучного інтелекту у ці моделі значно підвищує точність прогнозування, забезпечує адаптивне управління ресурсами та дозволяє оперативно реагувати на зміну умов виробництва. В основі енергоменеджменту лежить безперервний збір, обробка та аналіз даних про енергоспоживання. Математичні моделі, збагачені інтелектуальними алгоритмами, дозволяють враховувати широкий спектр параметрів: від технологічних (режим роботи, завантаження ліній) до метеорологічних, економічних та сезонних. Це створює

підґрунтя для оптимізації енергетичних потоків і забезпечення стабільної роботи підприємства за умов змінного виробничого навантаження.

Попри високий рівень автоматизації, ключовим залишається людський фактор. Надійність функціонування інтелектуальних систем управління енергоефективністю вимагає постійного контролю з боку кваліфікованого персоналу, здатного оцінювати адекватність запропонованих рішень та коригувати їх у разі відхилення від цільових показників. Таким чином, поєднання математичного моделювання, штучного інтелекту та людського експертного контролю створює ефективну основу для підвищення енергетичної ефективності сучасних виробничих підприємств.

References

1. Deshko, V. I., Bilous, I. Yu., & Hurska, Yu. V. (2016). Do zastosuvannya rehresiinoho analizu dlia prohnozuvannya enerhospozhyvannya budivel [On the application of regression analysis for forecasting energy consumption in buildings]. In *Enerhetychnyi menedzhment: stan ta perspektyvy rozvytku – PEMS'16* (p. 77). NTUU "KPI". http://pems.kpi.ua/public/conferences/51/PEMS-2016/Zbirnyk_tez_2016.pdf (in Ukrainian)
2. Matsui, A. M., & Kondratets, V. O. (2018). Matematychnе modeliuвання avtomatychnoho kontroliu enerhoefektyvnosti podribnennia rudy kulovymy mynamy pry spratsiuvanni futerovky [Mathematical modeling of automatic control of ore grinding energy efficiency in ball mills as the lining wears]. *Problemy informatsiinykh tekhnolohii – Problems of Information Technologies*, (1), 111–117. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pit_2018_1_17 (in Ukrainian)
3. Nakhodov, V. F., Ivanko, D. O., & Holovko, A. V. (2013). Vybir metodiv matematychnoho modeliuвання protsesiv enerhospozhyvannya v systemakh operatyvnoho kontroliu enerhoefektyvnosti [Selection of mathematical modeling methods for energy consumption processes in energy efficiency monitoring systems]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, (Special issue), 20–27. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/75c3a87c-175d-4b54-a328-b9926f0d5d2a/content> (in Ukrainian)
4. Ponomar, O. A. (2022). *Matematychnе modeliuвання enerhoefektyvnosti v lokalnykh enerhetychnykh ostrovakh hibrydnoho typu* [Mathematical modeling of energy efficiency in local hybrid-type energy islands] (Bachelor's thesis, Kyiv National University of Technologies and Design). KNUTD. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/22803> (in Ukrainian)
5. Nakhodov, V. F., Borychenko, O. V., & Ivanko, D. O. (2013). Kontrol efektyvnosti enerhovykorystannia v systemi enerhetychnoho menedzhmentu [Control of energy use efficiency in the energy management system]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnogo universytetu tekhnolohii ta dyzainu – Bulletin of Kyiv National University of Technologies and Design*, (6), 67–77. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vknutd_2013_6_10 (in Ukrainian)
6. Sanytskyi, M. A., Kotiv, M. V., & Marushchak, U. D. (2014). *Matematychnе modeliuвання v doslidzhenni enerhoefektyvnosti budivelnykh ob'ektiv* [Mathematical modeling in the study of energy efficiency of construction sites]. *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi*, (6), 254–259. <https://repository.knuba.edu.ua/items/cea5a18b-fd53-4bb3-870a-a6bf23b4f168> (in Ukrainian)
7. Sukhodolia, O. M. (2022). *Shtuchnyi intelekt v enerhetytsi: Analitychna dopovid* [Artificial intelligence in energy: Analytical report]. NISS. <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.09> (in Ukrainian)
8. Digitap. (2024). Energy management: An effective way to ensure efficient energy consumption. *digitap.com.ua*. <https://digitap.com.ua/decisions/upravlinnya-energoresursamy>
9. Boodhoo, K. (2024). *Machine learning methodologies for real-world resilient energy systems* (EngD thesis). University of Nottingham. <https://eprints.nottingham.ac.uk/79870>
10. Kyriakarakos, G. (2025). Artificial intelligence and the energy transition. *Sustainability*, 17(3), 1140. <https://doi.org/10.3390/su17031140>
11. Hafemeister, D. (2008). *Physics of energy efficient buildings*. <https://home.agh.edu.pl/~kozlow/fizyka/energooszczedny%20dom/Physics%20of%20Energy%20Efficient%20Buildings.pdf>