

УДК 005.51:620.9:004.8

DOI: 10.60022/3(4)-27S

Соловій Павло Сергійович

здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем
Національний університет «Львівська політехніка», Україна

Solovii Pavlo

PhD student of the Department of Specialized Computer Systems
Lviv Polytechnic National University, Ukraine
ORCID: 0009-0004-4145-0064

Ткачук Тарас Ігорович

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем
Національний університет «Львівська політехніка», Україна

Tkachuk Taras

PhD in Engineering, Senior Lecturer of the Department of Specialized Computer Systems
Lviv Polytechnic National University, Ukraine
ORCID: 0000-0002-5282-8673

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. У статті досліджено сучасні підходи до підвищення ефективності управління енергетичною інфраструктурою із застосуванням технологій штучного інтелекту. Проведено аналіз можливостей використання машинного навчання, глибоких нейронних мереж, багатопотокових агентських систем та аналітики великих даних у різних сегментах енергетичних систем: виробництві, транспортуванні та розподілі, споживанні енергії та системному управлінні. Показано, що інтеграція штучного інтелекту дозволяє підвищити точність прогнозування генерації та навантаження, оптимізувати енергопотоки, скоротити експлуатаційні витрати та підвищити надійність постачання енергії.

Особлива увага приділена використанню штучного інтелекту у системах відновлюваної енергетики. Це зумовлено нестабільністю генерації електроенергії та необхідністю адаптивного управління та балансування ресурсів у реальному часі. Встановлено, що технології предиктивного обслуговування та інтелектуального аналізу даних дозволяють зменшити прості обладнання, підвищити стійкість мереж і знизити ризики аварійних ситуацій. Розглянуто взаємодію цифрових технологій, таких як Інтернет речей та блокчейн, зі штучним інтелектом у контексті розвитку інтелектуальних енергетичних систем та розподіленої генерації.

У статті підкреслюється, що ефективна інтеграція штучного інтелекту в енергетику потребує комплексного підходу, який враховує технічні, економічні, соціальні та регуляторні аспекти. Дослідження підтверджує, що впровадження штучного інтелекту сприяє формуванню адаптивних, гнучких і стійких енергетичних інфраструктур, здатних ефективно реагувати на коливання попиту та пропозиції, забезпечувати економічну ефективність та інтеграцію відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: енергоменеджмент, енергетична інфраструктура, машинне навчання, відновлювана енергетика, smart grid, оптимізація енергоспоживання, передбачуване обслуговування, цифровізація енергетики.

METHODS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF ENERGY INFRASTRUCTURE MANAGEMENT USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

Abstract. This paper examines contemporary approaches to improving the efficiency of energy infrastructure management using artificial intelligence technologies. The study analyses methods for



© Автор(и). Ця стаття знаходиться у відкритому доступі та розповсюджується відповідно до умов ліцензії Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

enhancing the efficiency of energy infrastructure management using artificial intelligence technologies. It has been established that the integration of machine learning algorithms, deep neural networks, multi-threaded agent-based systems and big data analytics makes it possible to improve the accuracy of generation and load forecasting, optimise energy distribution in networks and reduce operational costs. The results of the study demonstrate that the application of AI facilitates the transition from reactive to proactive management of the energy system. An analysis was conducted of the potential for using machine learning, deep neural networks, multi-threaded agent systems and big data analytics in various segments of energy systems: generation, transmission and distribution, energy consumption and system management. It is shown that the integration of AI allows for improved accuracy in forecasting generation and load, optimisation of energy flows, reduction of operational costs, and increased reliability of energy supply.

Particular attention is paid to the application of AI in renewable energy systems. This is due to the intermittency of electricity generation and the need for adaptive control and real-time resource balancing. It has been established that predictive maintenance and intelligent data analysis technologies can reduce equipment downtime, improve grid stability and lower the risk of emergencies. The interaction of digital technologies, such as the Internet of Things and blockchain, with AI is examined in the context of the development of smart energy systems and distributed generation.

The article emphasises that the effective integration of AI into the energy sector requires a comprehensive approach that takes into account technical, economic, social and regulatory aspects. The role of digital and regulatory tools in ensuring the successful integration of AI into the energy sector is highlighted. It is found that the comprehensive implementation of technologies requires consideration of technical, economic and socio-organisational aspects, including data exchange standards, cybersecurity and the enhancement of staff digital literacy. Thus, the application of artificial intelligence in energy systems not only enhances the efficiency and flexibility of management but also lays the foundation for the development of adaptive, resilient and economically optimised energy infrastructures capable of meeting the current challenges and requirements of renewable energy development. The study confirms that the implementation of AI contributes to the formation of adaptive, flexible and resilient energy infrastructures capable of responding effectively to fluctuations in supply and demand, ensuring economic efficiency and the integration of renewable energy sources.

Keywords: *energy management, energy infrastructure, machine learning, renewable energy, smart grids, energy consumption optimisation, predictive maintenance, digitalisation of the energy sector.*

Постановка проблеми. Інтеграція технологій штучного інтелекту (ШІ) в енергетичну інфраструктуру змінює підходи до управління, зміщуючи акцент від реактивних до прогностичних моделей прийняття рішень. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє формувати підходи, керовані даними (data-driven) до управління енергосистемами, де рішення базуються на аналізі великих обсягів даних у режимі реального часу. У таких умовах управління енергетичною інфраструктурою трансформується в адаптивну систему, здатну оперативно реагувати на зміну попиту, коливання генерації з відновлюваних джерел та ризики функціонування мереж. У цьому контексті управління енергетичною інфраструктурою перетворюється на багатогранну складну задачу, яка потребує нових підходів до аналізу даних, прогнозів і прийняття рішень.

Збільшення обсягу даних, що виробляються енергетичними системами, а також розвиток сенсорних мереж і технологій Інтернету речей відкривають широкі можливості для застосування ШІ. Алгоритми машинного навчання і нейронні мережі надають змогу в режимі реального часу обробляти великі обсяги даних, виявляти приховані патерни, створювати прогнози щодо споживання, генерації і технічного стану інфраструктури. Штучний інтелект відкриває нові можливості для оптимізації роботи енергетичних систем, зокрема через прогнозування навантаження, автоматизоване балансування енергопотоків, швидке виявлення аварійних ситуацій і підвищення енергоефективності. Він сприяє розвитку адаптивних та саморегульованих енергетичних мереж, що дозволяє їм відповідати на зміну зовнішніх умов. Водночас застосування ІТ технологій передбачає чітке визначення предметної області, постановку дослідницьких завдань і врахування міждисциплінарності, що охоплює технічні, економічні та соціальні аспекти управління.

Сучасні технології ШІ включають роботу з різними типами даних (структуровані й неструктуровані), застосування інтелектуального аналізу даних і методів машинного навчання. При цьому розглядається енергетична інфраструктура як єдина цифрова екосистема, що включає підсистеми виробництва, зберігання, передачі та споживання енергії.

Використання ШІ, зокрема машинного навчання, когнітивних обчислень, аналітики великих даних пропонується як оптимальний спосіб підвищення ефективності інтелектуальних енергосистем. У той же час поєднання досягнень у ІТ-сфері із соціально-економічними підходами формує основу

для розвитку методів дослідження і розвитку інфраструктури модерної енергетики. У зв'язку з вищезазначеним, актуальними є дослідження методів підвищення ефективності управління енергетичною інфраструктурою з використанням підходів ІІІ, що дають змогу забезпечити надійність, економічність і екологічну стабільність енергосистем у сучасних реаліях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях управління енергетичною інфраструктурою провідним є напрямок, пов'язаний із застосуванням ІІІ з метою підвищення ефективності прийняття рішень і оптимізації споживання енергії. Особливу увагу приділяють системам опалення, вентиляції і кондиціонування повітря, які становлять більшу частину енергоспоживання будівель. Зокрема, С. Агхілі та співавтори показують доцільність використання машинного навчання для прогнозування навантажень та адаптивного керування HVAC системами, що дає змогу досягти енергоефективності без погіршення умов експлуатації [1, с. 1008].

Вивчення проблематики управління розподільчими енергетичними системами здійснено в роботі П. Аревало та Ф. Хурадо, де показано, що застосування ІІІ в розумних мережах (smart grid) допомагає точніше прогнозувати генерацію й споживання енергії, а також забезпечує балансування енергопотоків у реальному часі [2, с. 4]. Особливо важливо за використання відновлюваних джерел енергії, що мають нестабільність в генерації.

Виділений напрям досліджень – скорочення втрат у розподільчих мережах. І. Блінов, В. Радзюкінас, П. Шиманюк та колеги пропонують застосувати глибокі нейронні мережі для аналізу режимів роботи мережі та виявлення неефективних ділянок, що дозволяє підвищити точність управлінських рішень з мінімізації втрат електроенергії [3, с. 30]. У ракурсах стратегічного розвитку енергетичної інфраструктури А. Бойко, В. Миргород, Н. Стоянець, О. Резнік наголошують на необхідності поєднання інноваційних технологій з принципами сталого розвитку, що передбачає модернізацію управлінських підходів та інтеграцію цифрових інструментів у практику управління енергетикою [4, с. 1].

Узагальнюючі дослідження А. Ханафі, М. Моавед, О. Абделлатіф показують широкий спектр застосування ІІІ в енергетичних системах будівель – від оптимізації споживання до прогнозування стану обладнання, що дозволяє знижувати витрати на обслуговування і підвищувати надійність систем [5, с. 26]. Подібної думки дотримуються Д. Карпенко, Т. Євтухова, О. Новосельцев, які розглядають комплекси ІІІ технологій, як інструмент трансформації енергетичних систем у напрямі підвищення їх гнучкості та адаптивності [6, с. 41]. Важливим аспектом є застосування ІІІ в інтелектуальній інфраструктурі та електроенергетичних системах. М. Хан, Б. Ахмад, М. Шоаїб та колеги підкреслюють, що поєднання машинного навчання, аналітики великих даних і автоматизованих систем керування створює передумови для побудови саморегульованих енергетичних мереж [7, с. 2005]. Додатково А. Кузьор, М. Сіра, П. Брожек розглядають синергію технологій блокчейн та ІІІ як інструмент підвищення прозорості та ефективності енергетичного менеджменту [8, с. 69]. У контексті України особливу увагу привертають дослідження О. Кузьменко, В. Чорна, Л. Кожура, де акцентовано на застосуванні ІІІ для оптимізації розрахунків енергоспоживання та зменшення надлишкової генерації в умовах післявоєнного відновлення енергетичної системи [9, с. 153]. Практичні аспекти оптимізації енергетичного менеджменту на рівні об'єктів нерухомості розглядає Цз. Лі, який пропонує стратегії управління на основі інтелектуального аналізу даних та адаптивного планування енергоспоживання [10, с. 4].

Перспективи подальшого розвитку досліджень у сфері управління енергетичною інфраструктурою із застосуванням ІІІ нерозривно пов'язані з формуванням інституційних та нормативних передумов для його впровадження. Зокрема, Г. Матвієнко, С. Кучеркова, В. Яновська та співавтори аналізують роль державного регулювання та управління у стимулюванні впровадження ІІІ-технологій в енергетиці України та наголошують на необхідності створення такого регуляторного середовища, яке б сприяло інноваціям та забезпечувало безпечну інтеграцію інтелектуальних систем в енергетичну інфраструктуру [11, с. 1]. Саме завдяки такому підходу розглядаються питання цифровізації енергетики не лише як виклик технологічний, а й як процес управлінський.

У технічному аспекті управління інфраструктурою одне з ключових завдань – забезпечення якості електроенергії. В цьому контексті А.-Д. Ольтяну, С. Георге, Г. Чікко розглядають застосування ІІІ для моніторингу та стабілізації параметрів електромереж, зокрема напруги та частоти, що дає змогу оперативно виявляти відхилення та запобігати аварійним ситуаціям [12, с. 494]. Таким чином системи управління розширюють свої функції: від простого контролю параметрів мережі до прогнозування подій і попередження порушень.

Великий внесок у розвиток децентралізованих моделей енергоменеджменту здійснюють дослідження, присвячені поєднанню блокчейн-технологій і ІІІ. В. Павленко, І. Пономаренко, О. Моргулець та колеги доводять, що така синергія забезпечує прозорість процесів обміну енергетичними ресурсами, підвищує безпеку транзакцій та створює передумови для автономного функціонування

локальних енергетичних систем [13, с. 184]. Подібні підходи створюють платформу для розвитку розподіленої генерації та енергетичних спільнот.

Поступове розширення сфери застосування ІІІ простежується й в інших галузях інфраструктури. В. Фусакулкаджорн, А. Нуньєс, Х. Ванг та співавтори аналізують застосування ІІІ у транспортній інфраструктурі, зокрема у залізничних системах, де інтелектуальні алгоритми використовуються для прогнозного обслуговування та оптимізації ресурсів [14, с. 1]. Частково придбаний досвід є релевантним для енергетики, оскільки демонструє універсальність підходів до управління складними технічними системами.

Безпосередньо на рівні об'єктів енергоспоживання великий попит набувають рішення, що включають Інтернет речей та штучний інтелект. І. Роїк, Д. Міколаєвський, А. Мрожинський та колеги демонструють, що використання ІоТ-пристроїв разом з аналітичними алгоритмами дає змогу здійснювати індивідуальний моніторинг енергоспоживання у реальному часі та автоматично підлаштовувати режими роботи систем будівель [15, с. 1]. Саме це створює передумови для появи інтелектуальних енергетичних екосистем.

В роботі А. Сафари, М. Данешвар, А. Анварі-Могхаддам проведено системний огляд напрямів застосування ІІІ в енергетичному менеджменті, висвітлено основні технології – від машинного навчання до глибоких нейронних мереж – та розкрито їх роль у прогнозуванні, оптимізації і керуванні енергетичною діяльністю [16, с. 1]. Автори зазначають, що продуктивність таких систем значною мірою залежить від якості даних і узгодженості між різними рівнями управління.

Для України особливо цікаві дослідження, спрямовані на підвищення стійкості енергосистеми. О. Сікорська, Н. Остра, Ж. Малогулько та співавтори розглядають технічні заходи з блокування відключень електроенергії, підкреслюючи потребу в запровадженні інтелектуальних систем моніторингу і керування для забезпечення безперебійного постачання електроенергії [17, с. 76]. Допмагають цьому напрямку роботи А. Симоненко, Ю. Глущенко, які розглядають застосування технологій індустрії 4.0 для підтримки енергетики, зокрема шляхом цифровізації процесів і автоматизації керування [18, с. 28].

Відповідно до тенденції розвитку ВДЕ штучний інтелект застосовується для оптимізації виробництва ВДЕ та забезпечення техобслуговування обладнання. А. Сучі, Р. Аміні, А. Асрі, Н. Мартін демонструють, що використання технологій прогнозного технічного обслуговування дозволяє суттєво знижувати експлуатаційні витрати та підвищувати надійність роботи ВДЕ-установок [19, с. 29]. Аналогічно, К. Укоба, К. Олатунджі, Е. Адейоє та колеги звертають увагу на роль ІІІ у підвищенні ефективності ВДЕ-систем шляхом точних прогнозів вироблення електроенергії та наданні консультацій щодо найкращих варіантів використання ВДЕ-ресурсів [20, с. 1].

Сучасні дослідження яскраво демонструють тенденцію до комплексних рішень з управління енергетичною інфраструктурою, де штучний інтелект поєднується з іншими цифровими технологіями. Це дозволяє підвищити гнучкість, стійкість і ефективність енергосистем. Водночас актуальним залишається питання інтеграції окремих технологічних рішень у цілісні моделі управління, адаптовані до специфіки національних енергетичних систем.

Метою статті є аналіз методів підвищення ефективності управління енергетичною інфраструктурою із застосуванням технологій ІІІ.

Виклад основного матеріалу. Ситуація в енергетичній системі в Україні після повномасштабного вторгнення дає змогу розглядати штучний інтелект як ключовий елемент трансформації управління енергетичною інфраструктурою, зокрема у сфері відновлюваної енергетики. Його впровадження можна розглядати крізь призму невеликих революційних змін, за якими нові технології спочатку поступаються традиційним у деяких аспектах, але забезпечують інші переваги – гнучкість, адаптивність та здатність працювати з великими масивами даних.

В оглянутих роботах показано, що поєднання алгоритмів машинного навчання, передбачуваної аналітики та автоматизованих систем управління змінює правила гри у розвитку та функціонуванні енергетичних систем. Головний ефект досягається за рахунок переходу від реактивного до прогнозного управління (predictive management), під час якого рішення приймаються на основі прогнозів, а не лише поточних показників. Це стає особливо важливим у випадку відновлюваних джерел енергії, коли сильні флуктуації генерації потребують постійного балансування.

Конкретні вигоди від застосування ІІІ-технологій у сфері енергетичної інфраструктури відображаються у кількох площинах. По-перше, зростає точність прогнозу генерації електроенергії з відновлюваних джерел, що дає змогу зменшити ризики, пов'язані з їхньою варіабельністю. По-друге, розподіл навантаження у енергомережах оптимізується завдяки вивченню моделей споживання енергії і автоматичному регулюванню потоків електроенергії. По-третє, знижується вартість експлуатації завдяки впровадженню систем передбачуваного обслуговування, які дозволяють виявляти несправності до того, як вони стануть критичними.

Менеджмент енергетичної інфраструктури в умовах цифровізації. Цифровізація змінює підходи до менеджменту енергетичної інфраструктури. Сучасні системи дозволяють приймати рішення на основі даних (data-driven decision-making), а не тільки досвіду або нормативів. Дані надходять із сенсорів, smart meters, IoT-пристроїв і інформаційних систем [8; 16].

У традиційних системах управління енергією було реактивним. Рішення приймали після виникнення проблем. Цифровізація переводить управління у прогностичний режим (predictive management). Система може передбачати навантаження, ризики та потенційні відмови [1; 15].

AI-технології відіграють ключову роль у менеджменті. Machine Learning та predictive analytics дозволяють обробляти великі обсяги даних у режимі real-time. Це забезпечує ефективне планування, моніторинг і контроль процесів [3; 16].

Цифровізація змінює структуру менеджменту. З'являються децентралізовані моделі (decentralized management), які дозволяють приймати рішення окремим компонентам системи. Це особливо важливо для розумних мереж та інтеграції відновлюваної енергії [1; 17].

Менеджмент у цифрових енергетичних системах включає:

- планування споживання та виробництва енергії,
- оптимізацію розподілу ресурсів,
- управління ризиками і прогнозування потенційних збоїв,
- контроль якості даних і інтеграцію різних систем [6; 19].

Разом із цим зростають вимоги до управління (табл. 1) [6; 19].

Таблиця 1

Зміни в управлінні енергетичною інфраструктурою під впливом цифровізації

Характеристика	Традиційне управління	Цифровий менеджмент (з використанням ШІ)
Тип прийняття рішень	Реактивний	Прогностичний (predictive management)
Основа рішень	Досвід, нормативи	Дані (data-driven decision-making)
Джерела інформації	Обмежені, локальні	IoT, sensors, smart meters, big data
Швидкість реагування	Низька	Висока, real-time
Управління навантаженням	Статичне	Динамічне, adaptive management
Структура управління	Централізована	Частково децентралізована (decentralized management)
Інтеграція відновлюваних джерел енергії	Обмежена	Активна, з використанням прогнозування
Ризик-менеджмент	Після виникнення проблем	Risk-based management з елементами прогнозування

Джерело: складено авторами за даними [6; 19]

Цифровий менеджмент енергетичної інфраструктури робить управління більш ефективним і адаптивним. AI дозволяє передбачати проблеми, швидко приймати рішення і оптимізувати процеси. Використання прогностичної аналітики, machine learning та IoT зменшує втрати енергії, підвищує надійність і дозволяє ефективніше інтегрувати енергетичний сектор [5; 15]. Ефективність цифрового менеджменту залежить не лише від технологій, а й від якості даних, організації процесів та здатності системи діяти автономно, зберігаючи контроль над ризиками [10; 11].

Прогнозування генерації та навантаження. Для сонячних і вітрових електростанцій алгоритми прогнозують обсяги генерації на базі погодних умов, що дозволяє синхронізувати виробництво із споживанням і знижувати потребу в резервних джерелах. Для традиційної генерації ШІ забезпечує прогнозування навантаження та оптимізацію витрат палива, що безпосередньо впливає на зниження вартості енергії. Також застосовуються системи предиктивного обслуговування, які дозволяють прогнозувати збої в обладнанні і знижувати ризики експлуатації. На лінії передачі електроенергії це дозволяє уникнути перевантажень і підвищувати стабільність енергосистеми.

В літературі [6] йдеться про побудову інтелектуальних енергетичних систем, у тому числі про smart grids, які можна розглядати як децентралізовані мережі з високим рівнем автономії (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняння технік ШІ в управлінні інтелектуальною енергетичною системою

Техніка	Здатність обробляти великі обсяги даних	Вимоги до обчислювальних ресурсів	Можливість використання в реальному часі	Стійкість до помилок та змін у системі	Здатність адаптуватися до нових умов та сценаріїв
Machine Learning	Високий	Вище середнього	Середній	Середній	Середній

Продовження таблиці 2

Deep Learning	Дуже високий	Високий	Низький	Високий	Низький
Genetic Algorithms	Середній	Середній	Низький	Середній	Високий
Multi-Agent Systems	Високий	Високий	Високий	Високий	Високий

Джерело: складено авторами за даними [2]

У таких системах ІІІ відповідає за координацію дій генерації, зберігання та споживання електроенергії у реальному часі. Це, в свою чергу, дає змогу ефективніше використовувати ресурси та знижувати витрати у мережах.

Дослідження дає змогу простежити, що розвиток енергетичної інфраструктури відбувається у напрямі моделі як послуги (energy infrastructure as a service). У цій моделі ресурси інфраструктури (мережі, системи зберігання, обчислювальні потужності) надаються як послуга з можливістю масштабування відповідно до потреб користувача. Роль ІІІ у такій моделі полягає у забезпеченні автоматизації управління, гнучких тарифів і підвищенні ефективності використання ресурсів. Водночас існують межі системних обмежень. До них, зокрема, належать залежність якості рішень на основі ІІІ від якості даних, значні інвестиції, необхідні для розбудови цифрової інфраструктури, а також коливання на енергетичному ринку.

Енергетична інфраструктура характеризується складною багаторівневою структурою, що охоплює генерацію, транспортування, розподіл, споживання енергії та операційне управління системою. Для підвищення ефективності управління необхідна її функціональна декомпозиція, яка дозволяє визначити критичні точки застосування технологій ІІІ та забезпечити адресне впровадження інноваційних рішень. Виділення таких сегментів створює аналітичну основу для оптимізації управлінських процесів і підвищення енергоефективності.

У сегменті генерації енергії ІІІ використовується для оптимізації режимів роботи як традиційних, так і відновлюваних джерел. У випадку сонячних і вітрових електростанцій алгоритми машинного навчання прогнозують обсяги генерації на основі метеорологічних даних, що дозволяє узгоджувати виробництво з попитом і зменшувати потребу у резервних потужностях. Для традиційної генерації ІІІ забезпечує прогнозування навантаження та оптимізацію витрат палива, що безпосередньо впливає на зниження собівартості виробництва енергії.

Оптимізація та балансування енергетичних потоків. У процесах транспортування та розподілу енергії технології ІІІ забезпечують перехід до адаптивного управління мережами. Прогнозування навантаження на лінії електропередач дозволяє запобігати перевантаженням і підвищувати стабільність енергосистеми. У розподільчих мережах ІІІ застосовується для оперативного виявлення пошкоджень, що скорочує час відновлення та підвищує надійність постачання. Окремим напрямом є оптимізація роботи систем накопичення енергії, де алгоритми управління дозволяють балансувати процеси заряджання та розряджання з урахуванням динаміки попиту. Також важливим результатом є виявлення втрат енергії та їх локалізація, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат.

На рівні споживання ІІІ виступає інструментом оптимізації енергетичних витрат і підвищення ефективності використання ресурсів. У промисловості алгоритми аналізують виробничі процеси в режимі реального часу, ідентифікують неефективні режими роботи обладнання та дозволяють мінімізувати енергетичні втрати. У комерційному та побутовому секторах ІІІ застосовується для формування рекомендацій щодо споживання енергії на основі поведінкових моделей користувачів, що сприяє зниженню навантаження на мережу в пікові періоди.

Синергія цифрових технологій та ІІІ в галузі енергетики. Енергетика це взаємодія складних систем різних рівнів, починаючи з генерації, операції з енергетичними потоками, закінчуючи споживанням енергії та управлінням всією системою. Для підвищення ефективності управління цією системою необхідно її поділити на підсистеми, які дозволять знайти слабкі місця застосування ІІІ та впроваджувати цілеспрямовані інноваційні рішення (табл. 3).

Таблиця 3

Застосування ІІІ в управлінні енергетичною системою

Категорія	Приклади застосувань ІІІ
Виробництво енергії	- прогнозування виробництва з відновлюваних джерел - прогнозування технічного обслуговування обладнання - оптимізація графіків виробництва енергії - виявлення та діагностика несправностей обладнання - стратегії зменшення викидів

Продовження таблиці 3

Транспортування та розподіл енергії	- прогнозування навантаження та управління мережею - виявлення та локалізація несправностей у мережах - оптимізація роботи енергетичних сховищ - виявлення та зменшення втрат енергії - управління реакцією на попит - оптимізація розумних мереж та мікромереж
Споживання енергії	- прогнозування споживання енергії - оптимізація участі у попитних програмах - автоматизація промислових процесів для підвищення ефективності - персоналізовані рекомендації щодо споживання
Операції системи	- управління роботою системи та балансування мережі - оптимізація операцій на ринку та торгівлі - кібербезпека - автоматизація дотримання нормативних вимог та звітності

Джерело: складено авторами за даними [6; 9]

На рівні системного управління пріоритетом застосування ІІІ є підвищення надійності, безпеки та керованості енергетичної інфраструктури. Коли ІІІ-прогнози передбачають навантаження всієї системи, ідеальним чином розподіляють ресурси, а також сприяють тому, щоб енергія від зелених джерел могла ефективно потрапляти до споживачів. На підстанціях та центрах управління енергосистемою ІІІ дозволяє оперативно локалізувати аварійні ситуації та мінімізувати їх наслідки. Не менш важливим напрямом є кібербезпека, де інтелектуальні системи виявляють аномалії та потенційні загрози в режимі реального часу (табл. 4).

Таблиця 4

Застосування технологій ІІІ в управлінні енергоспоживанням промислових підприємств

Сфера застосування	Використовувані ІІІ-технології	Отримані ефекти	Основні обмеження
Прогнозування енергоспоживання	Глибоке навчання, аналіз часових рядів, ансамблеві моделі	Підвищення точності прогнозів; оптимізація контрактів на енергопостачання; зниження штрафів за перевищення лімітів; покращення планування навантаження	Залежність від якості даних; варіативність споживання; вплив погодних і економічних факторів
Предиктивне обслуговування енергетичного обладнання	Машинне навчання, IoT-сенсори, діагностика на основі даних	Зменшення простоїв; продовження терміну експлуатації обладнання; зниження витрат на ремонт; підвищення надійності систем	Інтеграція з застарілими системами; потреба у великому обсязі даних; складність налаштування моделей
Оптимізація розподілу енергії	Підкріплювальне навчання, нейронні мережі, предиктивна аналітика	Зниження технічних втрат; балансування навантаження в режимі реального часу; підвищення ефективності використання мережевих ресурсів	Високі обчислювальні витрати; вимоги до роботи в реальному часі; складність моделювання
Інтеграція відновлюваних джерел енергії	Машинне навчання, прогностичні моделі, оптимізаційні алгоритми	Зменшення вуглецевих викидів; підвищення енергетичної автономії; оптимізація використання ВДЕ; стабілізація генерації	Нестабільність генерації; складність інтеграції в існуючі мережі; залежність від зовнішніх умов
Участь у програмах керування попитом (Demand Response)	Рекомендаційні системи, прогнозні моделі, поведінковий аналіз	Зниження пікових навантажень; додаткові економічні вигоди; підвищення гнучкості енергоспоживання	Узгодження з виробничими процесами; обмежена готовність користувачів; регуляторні обмеження
Виявлення аномалій та витоків енергії	Алгоритми виявлення аномалій, розпізнавання патернів, кластеризація	Своєчасне виявлення втрат і несанкціонованого споживання; підвищення енергоефективності; відповідність нормативним вимогам	Хибні спрацювання; обмежений доступ до даних; складність інтерпретації результатів

Джерело: складено авторами за даними [4; 6]

У таблиці 4 представлені основні напрями застосування технологій ІІІ в управлінні енергоспоживанням промислових підприємств і відображаються їхні зв'язки з типами алгоритмів, отриманими ефектами та існуючими обмеженнями [19, с. 31]. Перший напрямок стосується

прогнозування енергоспоживання. Аналіз різних джерел показує, що використання моделей глибокого навчання і аналізу часових рядів дозволяє підвищити точність прогнозів у порівнянні з традиційними статистичними методами. Це впливає на якість планування енерговикористання, відкриває можливості для оптимізації договірних відносин з постачальниками енергії і зниження фінансових втрат. Однак ефективність цих моделей залежить від стабільності вхідних даних і їхньої чутливості до зовнішніх факторів, таких як погода і зміни виробничих навантажень. Другий напрям – передбачуване обслуговування техніки. Рішення на основі ШІ, інтегровані з IoT-сенсорами, дозволяють перейти від традиційного планового обслуговування до обслуговування залежно від стану техніки. Це може знизити ризик аварій і зупинок, але потребує великих обсягів даних і іноді неузгодженості з існуючими інфраструктурами, які не завжди підтримують сучасні цифрові протоколи. Оптимізація використання енергії заснована на застосуванні алгоритмів підкріплювального навчання і нейронних мереж, які можуть адаптувати режими роботи систем у реальному часі. Це призводить до зниження втрат і більш ефективного балансування навантажень. Однак існують обмеження, пов'язані з високими вимогами до обчислювальних ресурсів і складністю впровадження у критичних інфраструктурах. Інтеграція відновлюваних джерел розглядається як окремий напрямок, оскільки вона потребує вирішення проблеми нестабільності генерації. ШІ використовується для прогнозування виробництва і його узгодження з попитом. Це стосується підвищення частки відновлюваних джерел у енергетичному балансі, але супроводжується технічними проблемами інтеграції і залежністю від зовнішніх умов. Участь у програмах керування попитом показує, що ШІ може впливати не тільки на технічні параметри, але і на поведінку споживачів. Через вивчення моделей споживання системи формують рекомендації щодо змін навантаження, що знижує пікові перевантаження мережі. Однак основним обмеженням є необхідність гармонізації цих змін з виробничими процесами підприємств. Окремо розглядається виявлення аномалій і витоків енергії. Алгоритми аналізу моделей дозволяють розпізнавати незвичайні відхилення у споживанні, що сприяє зниженню втрат і підвищенню контролю за ресурсами. Однак існують проблеми з хибними спрацьовуваннями і обмеженим доступом до повних наборів даних.

Застосування нейромережових технологій в управлінні енергосистемою. Розробка типового зразка моделі розподільної електричної мережі дає змогу здійснювати достовірні прогнози навантажень та оцінки втрат електроенергії. Основою побудови моделі слугували історичні дані оператора системи розподілу України, що містили інформацію про навантаження у 16 контрольованих точках за період із 2017 по 2019 рік із 30-хвилинним інтервалом. Загальний об'єм вибірки становив 48 048 значень, що є достатнім для побудови та валідації моделей.

Для цілей моделювання було обрано тестову мережу середньої напруги CIGRE, адаптовану під параметри реально діючої української системи. Зокрема, було змінено характеристики лінії електропередачі та розподілено навантаження на відповідні вузли згідно із зібраними даними. Це забезпечило відповідність тестової мережі фактичним умовам експлуатації та підвищило достовірність розрахунків втрат мережі.

Аналіз даних показав, що вони містять пропуски та аномалії, які негативно впливають на точність прогнозування. Для їх виправлення було реалізовано двоетапний процес очищення даних, який базується на алгоритмі кластеризації DBSCAN. На першому кроці було зосереджено увагу на пошуку найбільш грубих аномалій у часових серіях та заміні їх значень на інтерпольовані. На другому кроці виконано аналіз залишкової частини даних після виділення трендової компоненти. Для врахування сезонних коливань також було застосовано ковзне середнє. Така процедура знизилася кількість помилкових виявлень аномалій та покращила якість даних.

Для оцінки надійності моделей були підготовлені два варіанти вибірок: одна із аномальними значеннями, інша – після очищення. Для тестування моделей було відібрано 336 значень (один тиждень), що дало змогу перевірити стійкість моделей до різноманітних змін у навантаженні.

Прогнозування здійснено за допомогою глибинних нейронних мереж (зокрема LSTM та eResNet). Результати свідчать, що комбінація моделювання навантажень із подальшими обчисленнями втрат дає кращу точність, ніж пряме прогнозування втрат. Значення похибки (MAPE) досягають приблизно 3,29%, що вказує на високу ефективність моделей.

Порівняння результатів короткострокового (1 доба) та середньострокового (7 діб) прогнозування показало, що моделі залишаються ефективними при збільшенні горизонту прогнозу, проте, чутливість до аномалій також підвищується. Обробка даних, однак, значно зменшує вплив нестандартних режимів роботи мережі на результати прогнозування. Дослідження топології мережі дозволяє прийняти оптимальне рішення по розподілу втрат: вузли, розташовані далеко від джерела живлення або в гілках з великим опором, є «гарячими» точками, з підвищеними втратами і більшою мінливістю навантаження. Це дозволяє визначити такі ділянки мережі, для яких має сенс застосовувати заходи оптимізації.

Реалізація моделей в Python з використанням бібліотеки Pandapower забезпечила широкий спектр

можливостей для моделювання і масштабування. Використання архітектурних прийомів (залишкові зв'язки, загальна модель для всіх вузлів, оптимізатор ADAM) дозволило зменшити ризик перенавчання і стабілізувати результати при обробці нових даних.

Порівняння з традиційними методами (ARIMA, Holt–Winters) показало їх недостатню ефективність при наявності складної нелінійної і нестационарної динаміки. Кращі результати дають нейромережеві методи, оскільки вони в змозі відтворити складні часові залежності, правильно функціонувати в умовах неповних даних і не потребують повторного навчання, якщо змінилася топологія мережі (крім випадку виникнення критичних режимів).

Аналіз ризиків та бар'єрів інтеграції ІІІ в енергетичну інфраструктуру. Щодо ризиків, інтеграція ІІІ в енергетичні системи відкриває для них нові можливості, проте й водночас супроводжується ризиками, які вимагають системного підходу до їх мінімізації. Технічні ризики включають залежність від якості даних, що використовуються алгоритмами; сенсорні мережі або комунікаційні лінії, які необхідні для збору даних, можуть давати збої; й обмеження обчислювальних ресурсів при роботі з великими обсягами даних. Некоректні прогнози або помилки в роботі алгоритмів можуть спричиняти збої в системі електропостачання, перевантаження мереж і інші проблеми.

Регуляторні і організаційні бар'єри також є важливими факторами, що впливають на інтеграцію ІІІ. Недостатня налагодженість правового поля, відсутність стандартів безпеки та обміну даними між операторами мереж і споживачами, а також низька готовність до цифровізації багатьох гравців енергоринку створюють значні бар'єри. В Україні це ускладнюється відновленням після війни і необхідністю адаптації технологій до існуючих регуляторних вимог.

Соціально-економічні ризики, як-от недостатній рівень цифрової грамотності користувачів і персоналу компаній, які використовують ІІІ, також мають значення. Ризики у сфері інформаційної безпеки не зникають, а лише нарастають, бо інтеграція ІІІ відкриває нові вектори для хакерських атак і шкідливих втручань у роботу системи.

Технологічні бар'єри включають складнощі в інтеграції нових рішень у існуючу інфраструктуру, особливо в разі використання застарілого обладнання і мереж, що мають обмежені комунікаційні можливості. Відсутність стандартів для обміну даними між підсистемами і незавершеність моделей взаємодії між елементами розумних мереж ускладнюють розгортання і централізоване управління ними.

Для зменшення ризиків, пов'язаних з імплементацією ІІІ, необхідний комплексний підхід, що включає технологічні інновації, адаптивні моделі управління і розробку регуляторних механізмів, які відповідним чином враховуватимуть безпеку і конфіденційність даних при інтеграції ІІІ. Стратегічні напрями, що можуть цьому сприяти, – це: поетапне впровадження алгоритмів в адаптаційних умовах, розвиток резервних механізмів (backup) управління, стандартизація даних і протоколів їх обміну, навчання персоналу та підвищення рівня цифрової грамотності користувачів і операторів мереж.

Висновки. У ході дослідження проведено аналіз методів підвищення ефективності управління енергетичною інфраструктурою із застосуванням технологій ІІІ. Встановлено, що інтеграція алгоритмів машинного навчання, глибоких нейронних мереж, багатопоточних агентських систем та аналітики великих даних дозволяє підвищити точність прогнозування генерації та навантаження, оптимізувати розподіл енергії в мережах і скоротити експлуатаційні витрати.

Результати моделювання на основі глибоких нейронних мереж (LSTM та eResNet) засвідчили, що запропонований підхід дозволяє досягти похибки прогнозування втрат електроенергії на рівні MAPE $\approx 3,29\%$, що суттєво перевищує точність традиційних методів (ARIMA, Holt–Winters). Застосування двоетапного очищення даних на основі алгоритму DBSCAN знизило чутливість моделей до аномалій та покращило стабільність прогнозів.

Дослідження також підкреслює роль цифрових та регуляторних інструментів у забезпеченні успішної інтеграції ІІІ в енергетику. Виявлено, що комплексне впровадження технологій потребує врахування технічних, економічних та соціально-організаційних аспектів, включно зі стандартами обміну даними, кібербезпекою та підвищенням цифрової компетентності персоналу.

Таким чином, застосування ІІІ в енергетичних системах не лише підвищує ефективність і гнучкість управління, а й формує основу для розвитку адаптивних, стійких та економічно оптимізованих енергетичних інфраструктур, що здатні відповідати сучасним викликам та вимогам розвитку відновлюваної енергетики.

Література

1. Aghili S. A., Haji Mohammad Rezaei A., Tafazzoli M., et al. Artificial intelligence approaches to energy management in HVAC systems: A systematic review. *Buildings*. 2025. Vol. 15, № 7. Art. 1008. <https://doi.org/10.3390/buildings15071008>

2. Arevalo P., Jurado F. Impact of artificial intelligence on the planning and operation of distributed energy systems in smart grids. *Energies*. 2024. Vol. 17, № 17. Art. 4501. <https://doi.org/10.3390/en17174501>
3. Blinov I., Radziukynas V., Shymaniuk P., et al. Smart management of energy losses in distribution networks using deep neural networks. *Energies*. 2025. Vol. 18, № 12. Art. 3156. <https://doi.org/10.3390/en18123156>
4. Boyko A., Myrhorod V., Stoyanets N., Reznik O. Managing energy infrastructure under the imperatives of sustainable development: A strategic and innovation-oriented perspective from Ukraine. *Marketing and Management of Innovations*. 2025. Vol. 16, № 4. Art. 16. <https://doi.org/10.21272/mmi.2025.4-02>
5. Hanafi A., Moawed M., Abdellatif O. Advancing sustainable energy management: A comprehensive review of artificial intelligence techniques in building. *Engineering Research Journal (Shoubra)*. 2024. Vol. 53, № 2. P. 26–46. <https://doi.org/10.21608/erjsh.2023.226854.1196>
6. Karpenko D., Yevtukhova T., Novoseltsev O. An integrated AI-based approach to transforming energy systems for sustainability and efficiency. *System Research in Energy*. 2025. № 3. P. 41–55. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.03.041>
7. Khan M. I., Ahmad B., Shoaib M., et al. Artificial intelligence and machine learning applications in smart infrastructure and electrical systems. *The Critical Review of Social Sciences Studies*. 2025. Vol. 3, № 1. P. 2005–2016. <https://doi.org/10.59075/v664jq68>
8. Kuzior A., Sira M., Brozek P. Using blockchain and artificial intelligence in energy management as a tool to achieve energy efficiency. *Virtual Economics*. 2022. Vol. 5, № 3. P. 69–90. [https://doi.org/10.34021/ve.2022.05.03\(4\)](https://doi.org/10.34021/ve.2022.05.03(4))
9. Kuzmenko O., Chorna V., Kozhura L. Implementation of artificial intelligence in energy consumption calculations to reduce excess generation in the context of Ukraine's recovery. *Baltic Journal of Economic Studies*. 2024. Vol. 10, № 1. P. 153–162. <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2024-10-1-153-162>
10. Li J. Optimization strategy of property energy management based on artificial intelligence. *Energy Informatics*. 2024. Vol. 7, № 1. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00383-7>
11. Matviienko H., Kucherikova S., Yanovska V., et al. Governmental management and regulatory measures for advancing AI in the Ukrainian energy sector as a basis for rapid and sustainable development of the Ukrainian economy. *2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/acit58437.2023.10275486>
12. Olteanu A.-D., Gheorghe S., Chicco G. Artificial intelligence-driven strategies for management in modern utility infrastructures: The role of AI on power quality management. *2025 25th International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)*. IEEE, 2025. P. 494–501. <https://doi.org/10.1109/cscs66924.2025.00079>
13. Pavlenko V., Ponomarenko I., Morhulets O., et al. Synergy of blockchain and artificial intelligence for decentralized smart energy management. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer Nature Switzerland, 2025. P. 184–194. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95191-6_18
14. Phusakulkajorn W., Nunez A., Wang H., et al. Artificial intelligence in railway infrastructure: Current research, challenges, and future opportunities. *Intelligent Transportation Infrastructure*. 2023. <https://doi.org/10.1093/iti/liad016>
15. Rojek I., Mikolajewski D., Mrozinski A., et al. Internet of things applications for energy management in buildings using artificial intelligence: A case study. *Energies*. 2025. Vol. 18, № 7. Art. 1706. <https://doi.org/10.3390/en18071706>
16. Safari A., Daneshvar M., Anvari-Moghaddam A. Energy intelligence: A systematic review of artificial intelligence for energy management. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, № 23. Art. 11112. <https://doi.org/10.3390/app142311112>
17. Sikorska O., Ostra N., Malogulko J., et al. Technical solutions to prevent blackouts in order to provide the population with electricity: The case of Ukraine. *Machinery & Energetics*. 2024. Vol. 15, № 1. P. 76–85. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2024.76>
18. Symonenko A. L., Hlushchenko Y. I. Implementation of innovative industry 4.0 technologies for the reconstruction of the energy sector of Ukraine. *Automation of Technological and Business Processes*. 2024. Vol. 16, № 3. P. 28–33. <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i3.2917>
19. Suci A. M., Amini R., Asri A. K., Martin N. Artificial intelligence in renewable energy: A review of predictive maintenance and energy optimization. *Journal of Clean Technology*. 2025. Vol. 2, № 1. P. 29–44. <https://doi.org/10.15294/joct.v2i1.27729>
20. Ukoba K., Olatunji K. O., Adeoye E., et al. Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: Review and future prospects. *Energy & Environment*. 2024. <https://doi.org/10.1177/0958305x241256293>

References

1. Aghili, S. A., Haji Mohammad Rezaei, A., Tafazzoli, M., et al. (2025). Artificial intelligence approaches to energy management in HVAC systems: A systematic review. *Buildings*, 15(7), Article 1008. <https://doi.org/10.3390/buildings15071008>
2. Arevalo, P., & Jurado, F. (2024). Impact of artificial intelligence on the planning and operation of distributed energy systems in smart grids. *Energies*, 17(17), Article 4501. <https://doi.org/10.3390/en17174501>
3. Blinov, I., Radziukynas, V., Shymaniuk, P., et al. (2025). Smart management of energy losses in distribution networks using deep neural networks. *Energies*, 18(12), Article 3156. <https://doi.org/10.3390/en18123156>
4. Boyko, A., Myrhorod, V., Stoyanets, N., & Reznik, O. (2025). Managing energy infrastructure under the imperatives of sustainable development: A strategic and innovation-oriented perspective from Ukraine. *Marketing and Management of Innovations*, 16(4), Article 16. <https://doi.org/10.21272/mmi.2025.4-02>
5. Hanafi, A., Moawad, M., & Abdellatif, O. (2024). Advancing sustainable energy management: A comprehensive review of artificial intelligence techniques in building. *Engineering Research Journal (Shoubra)*, 53(2), 26–46. <https://doi.org/10.21608/erjsh.2023.226854.1196>
6. Karpenko, D., Yevtukhova, T., & Novoseltsev, O. (2025). An integrated AI-based approach to transforming energy systems for sustainability and efficiency. *System Research in Energy*, 3, 41–55. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.03.041>
7. Khan, M. I., Ahmad, B., Shoaib, M., et al. (2025). Artificial intelligence and machine learning applications in smart infrastructure and electrical systems. *The Critical Review of Social Sciences Studies*, 3(1), 2005–2016. <https://doi.org/10.59075/v664jq68>
8. Kuzior, A., Sira, M., & Brozek, P. (2022). Using blockchain and artificial intelligence in energy management as a tool to achieve energy efficiency. *Virtual Economics*, 5(3), 69–90. [https://doi.org/10.34021/ve.2022.05.03\(4\)](https://doi.org/10.34021/ve.2022.05.03(4))
9. Kuzmenko, O., Chorna, V., & Kozhura, L. (2024). Implementation of artificial intelligence in energy consumption calculations to reduce excess generation in the context of Ukraine's recovery. *Baltic Journal of Economic Studies*, 10(1), 153–162. <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2024-10-1-153-162>
10. Li, J. (2024). Optimization strategy of property energy management based on artificial intelligence. *Energy Informatics*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00383-7>
11. Matviienko, H., Kucherikova, S., Yanovska, V., et al. (2023). Governmental management and regulatory measures for advancing AI in the Ukrainian energy sector as a basis for rapid and sustainable development of the Ukrainian economy. In *2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/acit58437.2023.10275486>
12. Olteanu, A.-D., Gheorghe, S., & Chicco, G. (2025). Artificial intelligence-driven strategies for management in modern utility infrastructures: The role of AI on power quality management. In *2025 25th International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)* (pp. 494–501). IEEE. <https://doi.org/10.1109/cscs66924.2025.00079>
13. Pavlenko, V., Ponomarenko, I., Morhulets, O., et al. (2025). Synergy of blockchain and artificial intelligence for decentralized smart energy management. In *Lecture Notes in Networks and Systems* (pp. 184–194). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95191-6_18
14. Phusakulkajorn, W., Nunez, A., Wang, H., et al. (2023). Artificial intelligence in railway infrastructure: Current research, challenges, and future opportunities. *Intelligent Transportation Infrastructure*. <https://doi.org/10.1093/iti/liad016>
15. Rojek, I., Mikolajewski, D., Mrozinski, A., et al. (2025). Internet of things applications for energy management in buildings using artificial intelligence: A case study. *Energies*, 18(7), Article 1706. <https://doi.org/10.3390/en18071706>
16. Safari, A., Daneshvar, M., & Anvari-Moghaddam, A. (2024). Energy intelligence: A systematic review of artificial intelligence for energy management. *Applied Sciences*, 14(23), Article 11112. <https://doi.org/10.3390/app142311112>
17. Sikorska, O., Ostra, N., Malogulko, J., et al. (2024). Technical solutions to prevent blackouts in order to provide the population with electricity: The case of Ukraine. *Machinery & Energetics*, 15(1), 76–85. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2024.76>
18. Symonenko, A. L., & Hlushchenko, Y. I. (2024). Implementation of innovative industry 4.0 technologies for the reconstruction of the energy sector of Ukraine. *Automation of Technological and Business Processes*, 16(3), 28–33. <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i3.2917>
19. Suci, A. M., Amini, R., Asri, A. K., & Martin, N. (2025). Artificial intelligence in renewable energy: A review of predictive maintenance and energy optimization. *Journal of Clean Technology*, 2(1), 29–44. <https://doi.org/10.15294/joct.v2i1.27729>

20. Ukoba, K., Olatunji, K. O., Adeoye, E., et al. (2024). Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: Review and future prospects. *Energy & Environment*. <https://doi.org/10.1177/0958305x241256293>

Отримано: 09.03.2026

Прийнято до публікації: 10.04.2026

Опубліковано: 15.04.2026