



УДК 621.311:004.896

[https://doi.org/10.52058/2786-5274-2026-4\(56\)-1597-1608](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2026-4(56)-1597-1608)

Остапенко Ольга Павлівна кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, <https://orcid.org/0000-0001-9682-9419>

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ У ГАЛУЗІ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ: МОЖЛИВОСТІ, ВИКЛИКИ ТА ЕТИЧНІ АСПЕКТИ

Анотація. У статті здійснено комплексний аналіз сучасного стану та перспектив застосування технологій штучного інтелекту (ШІ) у наукових дослідженнях та освітніх цілях у галузі теплоенергетики з урахуванням технічних, методологічних та етико-правових аспектів. Розглянуто чотири ключові напрями використання методів машинного навчання і нейронних мереж: прогнозування та оптимізація теплових процесів, предиктивне технічне обслуговування теплоенергетичного обладнання, оптимізація режимів роботи теплових генерувальних установок, а також комп'ютерне моделювання горіння та управління викидами шкідливих речовин. Показано, що фізично-інформовані нейронні мережі (PINN) та гібридні підходи забезпечують фізичну коректність результатів навіть при обмеженому обсязі навчальних даних. Встановлено, що системи предиктивного обслуговування здатні скоротити незаплановані простой обладнання і знизити витрати на ремонт. Окрему увагу приділено методологічним викликам: проблемам якості та репрезентативності даних, інтерпретованості моделей та коректної валідації часових рядів. Проаналізовано вимоги Регламенту ЄС про штучний інтелект (EU AI Act 2024/1689) щодо систем ШІ у критичній інфраструктурі – зокрема, вимоги до управління ризиками, прозорості алгоритмів і людського нагляду. Обґрунтовано перспективність концепції цифрового двійника теплоенергетичного об'єкта та роль генеративного ШІ в прискоренні наукових досліджень.

Визначено системні бар'єри для впровадження ШІ-рішень у галузі та підкреслено необхідність міждисциплінарної підготовки фахівців. Визначено, що перспективними напрямками подальших досліджень є розробка стандартизованих методологічних протоколів для валідації ШІ-моделей у теплоенергетиці, розвиток методів застосування ШІ для прикладних задач галузі, а також вивчення організаційних та етичних аспектів впровадження ШІ-рішень на енергетичних підприємствах.

Ключові слова: штучний інтелект, машинне навчання, теплоенергетика, нейронні мережі, предиктивна аналітика, оптимізація теплових процесів, EU AI Act, цифровий двійник.





Ostapenko Olha Pavlivna Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, <https://orcid.org/0000-0001-9682-9419>

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN SCIENTIFIC RESEARCH IN THE THERMAL POWER INDUSTRY: OPPORTUNITIES, CHALLENGES AND ETHICAL ASPECTS

Abstract. The article provides a comprehensive analysis of the current state and prospects for the application of artificial intelligence (AI) technologies in scientific research and educational purposes in the field of thermal power engineering, taking into account technical, methodological, and ethical and legal aspects. Four key areas of use of machine learning methods and neural networks are considered: forecasting and optimization of thermal processes, predictive maintenance of thermal power equipment, optimization of operating modes of thermal generating units, as well as computer modeling of combustion and control of emissions of harmful substances. It is shown that physically informed neural networks (PINN) and hybrid approaches ensure the physical correctness of results even with a limited amount of training data. It is established that predictive maintenance systems are able to reduce unplanned equipment downtime and reduce repair costs. Special attention is paid to methodological challenges: problems of data quality and representativeness, interpretability of models, and correct validation of time series. The requirements of the EU Regulation on Artificial Intelligence (EU AI Act 2024/1689) for AI systems in critical infrastructure are analyzed – in particular, the requirements for risk management, algorithm transparency and human oversight. The prospects of the concept of a digital twin of a thermal energy facility and the role of generative AI in accelerating scientific research are substantiated. Systemic barriers to the implementation of AI solutions in the industry are identified and the need for interdisciplinary training of specialists is emphasized. It was determined that promising areas of further research are the development of standardized methodological protocols for validating AI models in the thermal power industry, the development of methods for applying AI for applied problems in the industry, as well as the study of organizational and ethical aspects of implementing AI solutions at energy enterprises..

Keywords: artificial intelligence, machine learning, thermal power engineering, neural networks, predictive analytics, thermal process optimization, EU AI Act, digital twin.

Постановка проблеми. Глобальний енергетичний сектор зараз переживає безпрецедентну трансформацію, яка зумовлена одночасним впливом кліматичних викликів, цифровізацію промисловості та стрімкого розвитку технологій штучного інтелекту. Теплоенергетика є галуззю, що традиційно базується на детерміністських інженерних підходах та накопиченому емпіричному досвіді,



зараз стикається з необхідністю забезпечення інтеграції принципово нових методологічних інструментів, здатних опрацьовувати великі масиви даних та виявляти сховані закономірності в складних теплофізичних процесах [1, 2].

Штучний інтелект (ШІ), за визначенням Регламенту Європейського Союзу 2024/1689 (EU AI Act), являє собою «машинно-орієнтовану систему, розроблену для функціонування з різним ступенем автономності, яка може продемонструвати адаптивність після розгортання та яка на основі отриманих вхідних даних виводить (для явних чи неявних цілей) результати, – такі, як: прогнози, контент, рекомендації або рішення, та здатність впливати на фізичне або віртуальне середовище» [2]. Таке трактування чітко окреслює потенціал ШІ для теплоенергетичних систем, де вхідними даними є результативність вимірювань температури, тиску, витрат теплоносія, а вихідними є рішення щодо оптимального режиму роботи обладнання або прогнози його технічного стану.

За останнє десятиліття кількість наукових публікацій, присвячених застосуванню методів машинного навчання в теплоенергетиці, зростає в рази. Така тенденція розвитку наукових публікацій підтверджує не лише науковий інтерес до вказаної проблематики, але й окреслює практичну потребу в інтелектуальних рішеннях у промисловості.

Водночас, масштабне впровадження ШІ-технологій створює низку фундаментальних питань щодо забезпечення надійності і відтворюваності результатів, отриманих за допомогою ШІ. Постають питання встановлення відповідальності за прийняті рішення та алгоритми в критичних ситуаціях. Виникає проблема узгодження вимог до продуктивності моделей із принципами захисту персональних та виробничих даних. Ці питання набувають особливої гостроти в контексті прийнятого в ЄС регуляторного законодавства у сфері ШІ [3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту докорінно змінює ландшафт теплоенергетичної галузі, відкриваючи безпрецедентні можливості для підвищення операційної ефективності та оптимізації енергетичних систем. У сфері наукових досліджень із теплоенергетики ШІ-методології знаходять застосування у широкому спектрі завдань. В області комп'ютерного моделювання та прогностичного аналізу це охоплює розробку високоточних цифрових двійників теплоенергетичних об'єктів, коротко- та довгострокове прогнозування попиту на енергію та профілів навантаження, а також симуляцію складних термодинамічних явищ [5 – 11].

Крім того, технології ШІ демонструють значний потенціал у сфері оптимізації роботи енергетичних систем – зокрема, адаптивного диспетчерського управління тепловими електростанціями, динамічного балансування теплової генерації відповідно до попиту, а також системного зниження теплових втрат у мережах централізованого тепlopостачання [5 – 6, 8 – 11].

Окремим і практично значущим напрямом застосування ШІ є технічна діагностика енергетичного обладнання на основі оцінки його поточного стану.



Це включає автоматизоване виявлення аномалій в роботі енергетичних установок, імовірнісне прогнозування відмов обладнання, оптимізацію графіків технічного обслуговування та подовження ресурсу теплоенергетичних активів [11].

Комп'ютерне моделювання є одним із стратегічно найвагоміших напрямів застосування ШІ в теплоенергетиці [6, 8 – 11]. Сучасні ШІ-методики дозволяють створювати високоточні представлення складних термодинамічних процесів і великомасштабних енергетичних систем. Нижче наведено основні методологічні підходи, що застосовуються в цьому контексті.

Стосовно моделювання теплових мереж, ШІ-методи розв'язують завдання прогнозування теплових втрат у трубопровідних системах, оптимізації гідравлічних режимів теплових мереж та імітаційного моделювання аварійних ситуацій з наступним превентивним плануванням. Для інтегрованих енергетичних систем відповідні застосування охоплюють моделювання спільної роботи електричних і теплових мереж, оптимізацію диспетчеризації когенераційних установок і балансування попиту та пропозиції в рамках інтелектуальних систем тепlopостачання [5 – 6, 8 – 11].

Одним із найбільш розвинених напрямків застосування ШІ в теплоенергетиці є побудова прогнозних моделей теплообміну та гідродинаміки.

Традиційні методи чисельного моделювання (метод скінченних елементів, метод скінченних різниць, метод скінченних об'ємів) забезпечують високу точність результатів, проте потребують значних обчислювальних ресурсів і часу. Методи машинного навчання забезпечують суттєве зниження загальнообмінних навантажень за рахунок навчання замічених моделей (сурогатних моделей), які апроксимують системи поведінки на основі попередньо розрахованих або вимірених даних.

Перспективним напрямком є також застосування методів фізично-інформованих нейронних мереж (Physics-Informed Neural Networks, PINN). Ключова особливість цього підходу полягає у включенні диференціальних рівнів теплофізики (рівняння теплопровідності, Нав'є-Стокса, енергії), що гарантує фізичну коректність одержуваних навіть при обмеженні кількості навчальних даних. Цей підхід розвивається в задачах теплового моніторингу конструкцій енергетичного обладнання.

Предиктивне технічне обслуговування (Predictive Maintenance, PdM) є однією з найбільш економічно значущих програм ШІ в теплоенергетиці. Традиційні стратегії обслуговування (планово-попереджувальний ремонт або реакційне обслуговування після відмови) здійснюються шляхом підходів, заснованих на безперервному моніторингу технічного стану обладнання та прогнозуванні залишкового ресурсу. Технічні системи PdM базуються на аналізі сигналів вібрації, температури, тиску, хімічного складу та інших діагностичних параметрів. Особливо актуальним для теплоенергетики є прогнозування залишкового ресурсу парових турбін та котлів.



Задача диспетчерського управління тепловою електростанцією, або іншою теплогенерувальною системою, традиційно вирішується в рамках класичної теорії автоматичного управління та методів математичного програмування. Однак, динамічна природа сучасних енергосистем, пов'язана зі збільшенням частки відновлюваних джерел енергії та нерівномірністю навантаження, вимагає більших гнучких підходів до оптимізації.

Алгоритми навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL) демонструють особливий потенціал для вирішення завдань управління тепло-енергетичними об'єктами. Принцип дії RL відповідає природі управлінських завдань: агент (система управління) взаємодіє зі середовищем (технологічний процес), отримуючи сигнали для досягнення цільових показників ефективності.

Оптимізація теплопостачання міських мереж є ще одним напрямком, де методи ШІ знаходять широке застосування. Системи централізованого теплопостачання в Україні, Польщі та балтійських країнах характеризуються значною інерцією трубопровідних мереж, що ускладнює традиційне прогнозне управління. Методи ансамблевого навчання та рекурентні нейронні мережі дозволяють точніше прогнозувати теплове навантаження з урахуванням метеорологічних чинників, поведінки споживачів та характеристик теплових мереж.

Процеси горіння палива в топкових камерах котлів є надзвичайно складними з точки зору математичного моделювання, оскільки поєднують турбулентну аеродинаміку, теплообмін випромінюванням, хімічну кінетику та масообмін. Пряме чисельне моделювання (Direct Numerical Simulation, DNS) таких процесів потребує колосальних обчислювальних ресурсів і залишається практично неможливим для промислових масштабів.

Машинне навчання відкриває нові можливості в цьому напрямі шляхом створення замінних моделей для закриття системи турбулентних рівнів. Також, підхід «Machine Learning Turbulence Closure» (ML-TC) забезпечує навчання нейронної мережі за результатами DNS-розрахунків для апроксимації підсіткових напружень у моделях великих вихорів (Large Eddy Simulation, LES). Це дозволяє суттєво зменшити обчислювальні навантаження при збереженні прийнятої точності.

У задачах управління викидами шкідливих речовин (NO_x , SO_2 , CO_2) від теплових електростанцій або інших теплогенерувальних установок, методи ШІ застосовуються як для точного прогнозування концентрацій забруднювачів, так і для оптимізації параметрів горіння з метою мінімізації викидів [12].

Мета статті – комплексний аналіз сучасного стану та перспектив застосування технологій штучного інтелекту в наукових дослідженнях в галузі теплоенергетики з урахуванням технічних, методологічних та етико-правових аспектів проблеми.

Виклад основного матеріалу. Проблема якості даних у теплоенергетиці часто пов'язана із систематичними похибками вимірювань. Попередня обробка



даних (data preprocessing), що включає виявлення аномалій, заповнення пропусків, нормалізацію та вибір ознак, є обов'язковим і трудомістким етапом дослідження. Для теплоенергетичних систем характерна проблема також розподільного зсуву (distribution shift): моделі, навчені на даних одного типу обладнання або кліматичної зони, можуть демонструвати суттєве зниження продуктивності при перенесенні на інший об'єкт. Методичне навчання (transfer learning) та доменна адаптація (domain adaptation) пропонуються як підходи до трансферу цієї проблеми.

Інтерпретованість результатів є критично важливою для наукових застосувань ШІ в теплоенергетиці. Інженер-теплоенергетик повинен не просто отримати результат прогнозу, але й розуміти фізичний механізм, що лежить в його основі, – в іншому випадку модель не може вважатися науковим інструментом, а залишається «чорною скринькою» з обмеженою евристичною цінністю.

Проблема пояснюваності ШІ (Explainable AI) активно досліджується науковою спільнотою. Методи SHAP (SHapley Additive Explanations), LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) та Grad-CAM дозволяють якісно оцінити вплив кожного вхідного чинника на результат моделювання. Для теплоенергетичних програм це означає, наприклад, можливість встановлення значимості: який з параметрів теплового стану обладнання найбільшою мірою забезпечить певний рівень КПД або спричинить ризик виникнення аварії.

Вимоги до прозорості та пояснюваності ШІ-систем закріплені й на рівнях європейського законодавства. Стаття 86 EU AI Act передбачає право постраждалих осіб отримувати «чіткого змісту та повні пояснення» щодо ролі ШІ-системи в процесі прийняття рішень [2]. Ця норма має безсереднє значення для теплоенергетики в контексті автоматизованих систем управління, що може впливати на режими роботи та встановлення наслідків для безпеки персоналу та навколишнього середовища.

Коректна валідація ШІ-моделей у застосуваннях до теплоенергетичних процесів вимагає особливої уваги з огляду на специфіку часових рядів: звичайні методи крос-валідації з випадковим розбиттям вибірки є неприйнятними для прогностичних моделей, оскільки призводять до «витоку даних із майбутнього» (data leakage).

Для часових рядів необхідно використовувати методи ковзного вікна або пряму крос-валідацію (forward chaining).

Верифікація моделей відповідно до фізичних обмежень (наприклад, перевірка виконання законів збереження енергії та маси) забезпечується певною кількістю додаткових критеріїв якості поряд із статистичними метриками. Метрики типу **RMSE (Root Mean Squared Error)** або **MAE (Mean Absolute Error)** відображають статистичну точність, але не гарантують фізичної коректності результатів. Фізико-інформаційні підходи, про які згадувалося вище, вирішують цю проблему на рівнях архітектури та моделі.



Прийняття у 2024 році Регламенту ЄС про штучний інтелект (Regulation (EU) 2024/1689) є знаковою подією для всіх галузей, що забезпечують технології ШІ, включаючи теплоенергетику [2]. Регламент запроваджує ризик-орієнтований підхід до регулювання ШІ-систем, диференціюючи їх за чотирма категоріями: неприйнятний ризик (захищені практики), високий ризик, обмежений ризик та мінімальний ризик.

Для теплоенергетичних продуктів найбільш релевантними є вимоги до системи ШІ з високим рівнем ризику. Згідно з Додатком III Регламенту, до категорії високого ризику відносяться ШІ-системи, що застосовуються в критичній інфраструктурі, до якої належать об'єкти виробництва, передачі та розподілу електроенергії та теплопостачання. Такі системи підлягають посиленню вимогам щодо управління ризиками, якості даних, ведення журналів подій, забезпечення прозорості та людського нагляду [2].

Оновлені рекомендації Єврокомісії щодо етичного використання штучного інтелекту [3] наголошують, що інтеграція етичних принципів у практику застосування ШІ – це не додаток до технічного впровадження, а його фундаментальна складова. Для наукових досліджень у теплоенергетиці це означає необхідність включення таких принципів, як людська гідність, справедливість, довіра та обґрунтований вибір у методології дослідження на всіх етапах – від постановки задачі до інтерпретації результатів. Теплоенергетика генерує величезні обсяги виробничих даних: щосекунди від сучасної ТЕС потужністю 500 МВт можна отримати тисячі вимірювань від різних датчиків. Значна частина цих даних може забезпечити інформацію про комерційне або стратегічне значення: дані про ефективність виробництва, склад палива, режими роботи.

Принципи захисту даних за General Data Protection Regulation (GDPR) та вимоги EU AI Act щодо якості та управління даними формують нові обов'язки для операторів теплоенергетичного обладнання, що застосовують ШІ. Таким чином, передбачаються зобов'язання щодо документування джерел, методів збору та обробки даних, а також оцінки деяких ризиків дискримінаційних результатів, пов'язаних із упередженістю навчальних виборів.

У контексті міжнародного науково-технічного співробітництва проблема обміну даними набуває додаткової гостроти: національні юрисдикції встановлюють різні вимоги до обміну та даних про критичну інфраструктуру. Для України, що прагне до інтеграції в європейський промисловий енергетичний простір, адаптація до вимог регуляторної бази ЄС є актуальним завданням як для наукових установ, так і для підприємств.

Застосування ШІ в системах управління теплоенергетичними об'єктами висуває високі вимоги до надійності та кібербезпеки. Атаки на ШІ-системи можуть реалізовуватися через так звані «змагальні приклади» (adversarial examples) – невеликі, спеціально підібрані збурення вхідних даних, які призводять до кардинально хибних передбачених моделей. У контексті



управління котлом або турбіною такий сценарій може мати катастрофічні наслідки.

EU AI Act містить вимоги до систем високого ризику, зобов'язання щодо «відповідного рівня надійності, кібербезпеки та точності» [2]. Це означає необхідність розробки ШІ-системи для теплоенергетики із закладеними механізмами стійкості до аномальних вхідних даних, автоматичного виявлення відхилень від нормальних режимів роботи та гарантованого переходу до безпечних режимів або до людського управління у разі виявлення несправностей.

Концепція цифрового двійника (Digital Twin) є одним із найбільш перспективних напрямків інтеграції ШІ в теплоенергетику. Цифровий двійник представляє собою динамічну цифрову модель фізичного об'єкта, що постійно використовується на основі реальних вимірювань та здатна відтворювати поточний технічний стан і прогнозувати майбутню поведінку об'єкта.

Для теплової електростанції цифровий двійник може охоплювати всі основні технологічні підсистеми: паровий котел, турбогенератор, системи водопідготовки та хімічного контролю, а також зовнішні чинники – характеристики палива, метеорологічні умови, параметри енергосистеми. Інтеграція ШІ в структуру цифрового двійника дозволяє реалізувати самонавчальні системи, які безперервно підвищують точність прогнозів у мірі накопичення досвіду роботи.

Поява великих мовних моделей (LLM, Large Language Model) та генеративного ШІ [4] відкриває нові можливості для прискорення наукових досліджень у теплоенергетиці. Застосування LLM для аналізу наукової літератури, генерації гіпотез, автоматизованого написання та рецензування кодів обчислювальних програм суттєво сприяє продуктивності дослідника.

Разом із тим, Оновлені рекомендації Єврокомісії з етичного використання ШІ [3] підкреслюють важливість критичного ставлення до результатів, які генеруються ШІ-системами, – зокрема, через характерну для LLM проблему «галюцинації», тобто генерування правдоподібного, але фактично хибного контенту.

У наукових дослідженнях некритичне використання LLM може призвести до поширення неперевіреної або навіть неправдивої інформації, що є неприпустимим порушенням принципів академічної доброчесності.

Питання академічної доброчесності в контексті ШІ є загально визнаним викликом для наукової спільноти. Провідні наукові видавництва вже оновили свої правила подання рукописів, вимагаючи прозорого декларування щодо використання ШІ-інструментів у процесі підготовки статей.

Глобальний енергетичний перехід до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) значно впливає на роль теплоенергетики: традиційні теплові станції все частіше використовують не як базові, а як пікові та маневрові потужності, що компенсують нестабільну генерацію вітрових та сонячних станцій. Це висуває принципово нові вимоги до динамічних характеристик теплового обладнання та системи управління.



ШІ має ще одну ключову роль у двох аспектах цієї трансформації. По-перше, методи прогнозування навантаження з урахуванням прогнозів виробництва ВДЕ дозволяють оптимальніше планувати диспетчеризацію теплових станцій. По-друге, алгоритми RL для управління режимами гнучкої роботи теплових котлів та турбін у режимах глибокого регулювання дозволяють подовжити ресурс обладнання та підвищити ефективність регулювання.

Попри значний науковий прогрес, впровадження ШІ-рішень у практику теплоенергетичних підприємств стикається з низкою системних бар'єрів. По-перше, це консервативна галузь, де рішення традиційно приймаються на основі перевірених детерміністських методів, а не ймовірних прогнозів «чорних скриньок». По-друге, суттєвою перешкодою є дефіцит кадрів, що забезпечують глибоку компетентність у галузі теплоенергетики та методів машинного навчання.

Відповідно до звіту JRC Publications Repository «Generative AI Outlook Report» (2025) [4], спеціалісти сфери енергетики становлять до 10 % професій, що найбільш активно взаємодіють із ШІ-технологіями. Це зумовлює необхідність системної роботи щодо підвищення ШІ-грамотності інженерних кадрів у теплоенергетиці – напрямку, що містить відображення у відповідних стратегічних документах ЄС [3].

Висновки. Проведений комплексний аналіз сучасного стану та перспектив застосування технологій штучного інтелекту в наукових дослідженнях та освітніх цілях у галузі теплоенергетики довів, що штучний інтелект сьогодні є не футуристичною перспективою, а є практичним інструментом, що активно трансформує методологію наукових досліджень у теплоенергетиці.

Основні висновки статті можна систематизувати таким чином:

1. Методи машинного навчання, нейронні мережі та гібридні фізично-інформовані підходи демонструють конкурентоспроможність або перевершувану точність за допомогою традиційних методів моделювання в задачах прогнозування теплообміну, оптимізації режимів горіння та прогнозування технічного стану обладнання.

2. Предиктивне технічне обслуговування на основі ШІ є одним із найбільш зрілих і економічно обґрунтованих програм у галузі, які здатні принести значну економію коштів при правильному впровадженні.

3. Концепція цифрового двійника, підсилена методами ШІ, є ключовою парадигмою для майбутнього розвитку теплоенергетики в умовах енергетичного переходу та зростання частки відновлюваних джерел.

4. Регулятивні вимоги EU AI Act формують нові обов'язкові стандарти для ШІ-систем у критичній інфраструктурі, включаючи теплоенергетику, – зокрема щодо управління ризиками, пояснюваності рішень, якості даних та людського нагляду.

5. Ключовими методологічними викликами залишаються проблеми якості та репрезентативності навчальних даних, інтерпретованості складних моделей,





надійної валідації з урахуванням специфіки часових рядів та забезпечення фізичної коректності результатів.

6. Успішна інтеграція ШІ в теплоенергетичні дослідження потребує міждисциплінарного підходу, що сприяє компетентності в теплофізиці, машинному навчанні та етиці цифрових технологій.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка стандартизованих методологічних протоколів для валідації ШІ-моделей у теплоенергетиці, розвиток методів застосування ШІ для прикладних задач галузі, а також вивчення організаційних та етичних аспектів впровадження ШІ-рішень на енергетичних підприємствах.

Література:

1. International Energy Agency (IEA). Digitalisation and Energy. Paris: IEA Publications, 2023. 188 p. URL: <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>.

2. European Data Protection Supervisor, (2025) AI Act Regulation (EU) 2024/1689 : Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence and amending Regulations (EC) No 300/2008, (EU) No 167/2013, (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1139 and (EU) 2019/2144 and Directives 2014/90/EU, (EU) 2016/797 and (EU) 2020/1828 (Artificial Intelligence Act) (Text with EEA relevance). Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2804/4225375>.

3. European Commission, Directorate-General for Education, Youth, Sport and Culture, (2026) Guidelines on the ethical use of artificial intelligence and data in teaching and learning for educators. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2766/7967834>.

4. Abendroth Dias, K., Arias Cabarcos, P., Bacco, F.M., Bassani, E., Bertolotti, A. et al., Generative AI Outlook Report - Exploring the Intersection of Technology, Society and Policy, Navajas Cawood, E., Vespe, M., Kotsev, A. And Van Bavel, R. (editors), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/1109679> (online), 10.2760/0991238 (print), JRC142598.

5. Chekifi, Tawfiq & Boukraa, Moustafa & Benmoussa, Amine. (2024). Artificial Intelligence for Thermal Energy Storage Enhancement: A Comprehensive Review. *Journal of Energy Resources Technology*. 146. 1-29. 10.1115/1.4065197.

6. Devasenan, Madhesh & Madhavan, Saritha. (2024). Thermal intelligence: exploring AI's role in optimizing thermal systems – a review. *Interactions*. 245. 10.1007/s10751-024-02122-6.

7. Khalid, S., Hwang, H., & Kim, H. S. (2021). Real-World Data-Driven Machine-Learning-Based Optimal Sensor Selection Approach for Equipment Fault Detection in a Thermal Power Plant. *Mathematics*, 9(21), 2814. <https://doi.org/10.3390/math9212814>

8. Olabi, A. G., Abdelghafar, A. A., Maghrabie, H. M., Sayed, E. T., Rezk, H., Radi, M. A., Obaideen, K., & Abdelkareem, M. A. (2023). Application of artificial intelligence for prediction, optimization, and control of thermal energy storage systems. *Thermal Science and Engineering Progress*, 39, Article 101730. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101730>

9. Safari, A., Daneshvar, M., & Anvari-Moghaddam, A. (2024). Energy Intelligence: A Systematic Review of Artificial Intelligence for Energy Management. *Applied Sciences*, 14(23), 11112. <https://doi.org/10.3390/app142311112>

10. Ukoba, K., Olatunji, K. O., Adeoye, E., Jen, T.-C., & Madyira, D. M. (2024). Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: Review and future prospects. *Energy & Environment*, 35(7), 3833-3879. <https://doi.org/10.1177/0958305X241256293> (Original work published 2024)



11. Zhu, Wenqian. (2019). Intelligent Construction and Management of Thermal Power Plant Based on Internet + Mode. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 252. 032068. 10.1088/1755-1315/252/3/032068.
12. Medhat A. Nemitallah, Mohammad A. Nabhan, Maad Alowaifeer, Agus Haeruman, Fahad Alzahrani, Mohamed A. Habib, Moustafa Elshafei, Mohammed I. Abouheaf, Mansur Aliyu, Motaz Alfarraj, Artificial intelligence for control and optimization of boilers' performance and emissions: A review, *Journal of Cleaner Production*, Volume 417, 2023, 138109, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138109>.

References:

1. International Energy Agency (IEA). Digitalisation and Energy. Paris: IEA Publications, 2023. 188 p. URL: <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>.
2. European Data Protection Supervisor, (2025) AI Act Regulation (EU) 2024/1689 : Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence and amending Regulations (EC) No 300/2008, (EU) No 167/2013, (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1139 and (EU) 2019/2144 and Directives 2014/90/EU, (EU) 2016/797 and (EU) 2020/1828 (Artificial Intelligence Act) (Text with EEA relevance). Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2804/4225375>.
3. European Commission, Directorate-General for Education, Youth, Sport and Culture, (2026) Guidelines on the ethical use of artificial intelligence and data in teaching and learning for educators. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2766/7967834>.
4. Abendroth Dias, K., Arias Cabarcos, P., Bacco, F.M., Bassani, E., Bertoletti, A. et al., Generative AI Outlook Report - Exploring the Intersection of Technology, Society and Policy, Navajas Cawood, E., Vespe, M., Kotsev, A. And Van Bavel, R. (editors), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/1109679> (online), 10.2760/0991238 (print), JRC142598.
5. Chekifi, Tawfiq & Boukraa, Moustafa & Benmoussa, Amine. (2024). Artificial Intelligence for Thermal Energy Storage Enhancement: A Comprehensive Review. *Journal of Energy Resources Technology*. 146. 1-29. 10.1115/1.4065197.
6. Devasenan, Madhesh & Madhavan, Saritha. (2024). Thermal intelligence: exploring AI's role in optimizing thermal systems – a review. *Interactions*. 245. 10.1007/s10751-024-02122-6.
7. Khalid, S., Hwang, H., & Kim, H. S. (2021). Real-World Data-Driven Machine-Learning-Based Optimal Sensor Selection Approach for Equipment Fault Detection in a Thermal Power Plant. *Mathematics*, 9(21), 2814. <https://doi.org/10.3390/math9212814>
8. Olabi, A. G., Abdelghafar, A. A., Maghrabie, H. M., Sayed, E. T., Rezk, H., Radi, M. A., Obaideen, K., & Abdelkareem, M. A. (2023). Application of artificial intelligence for prediction, optimization, and control of thermal energy storage systems. *Thermal Science and Engineering Progress*, 39, Article 101730. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101730>
9. Safari, A., Daneshvar, M., & Anvari-Moghaddam, A. (2024). Energy Intelligence: A Systematic Review of Artificial Intelligence for Energy Management. *Applied Sciences*, 14(23), 11112. <https://doi.org/10.3390/app142311112>
10. Ukoba, K., Olatunji, K. O., Adeoye, E., Jen, T.-C., & Madyira, D. M. (2024). Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: Review and futureprospects. *Energy & Environment*, 35(7), 3833-3879. <https://doi.org/10.1177/0958305X241256293> (Original work published 2024)
11. Zhu, Wenqian. (2019). Intelligent Construction and Management of Thermal Power Plant Based on Internet + Mode. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 252. 032068. 10.1088/1755-1315/252/3/032068.



12. Medhat A. Nemitallah, Mohammad A. Nabhan, Maad Alowaifeer, Agus Haeruman, Fahad Alzahrani, Mohamed A. Habib, Moustafa Elshafei, Mohammed I. Abouheaf, Mansur Aliyu, Motaz Alfarraj, Artificial intelligence for control and optimization of boilers' performance and emissions: A review, *Journal of Cleaner Production*, Volume 417, 2023, 138109, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138109>.

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.04.2026