

Скуріхін Владислав Ігорович, к.т.н., доц., доцент кафедри електричного транспорту, +38(095)745-31-77, vladscu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7415-7105

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

вул. Чорноглазівська 17, м. Харків, Україна, 61002

Зубенко Денис Юрійович, к.т.н., доц., викладач кафедри фізики та інформатики, +38(050)520-21-01, Denis04@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-6736-7849

Комунальний заклад «Харківський ліцей № 54 Харківської міської ради»

вул. Богомольця 4, м. Харків, Україна, 61157

Ємельянова Катерина Сергіївна, доктор філософії, ст. викл. кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст, +38(063)955-76-30, Kateryna.Bukhanova@kname.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7319-9255

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

вул. Чорноглазівська 17, м. Харків, Україна, 61002

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЦІ: ВІД ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДО КВАНТОВИХ ОБЧИСЛЕНЬ

Анотація. У статті проаналізовано сучасні комп'ютерні та інтелектуальні технології в електроенергетиці й електромеханіці, зокрема SCADA, IoT, цифрові двійники, методи AI та перспективи квантових обчислень. Визначено їх переваги для прогнозування й керування та окреслено основні обмеження практичного впровадження.

Ключові слова: електроенергетика, електромеханіка, штучний інтелект, IoT, квантові обчислення, прогнозування, керування електроприводом.

Skurikhin Vladislav, PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Transport, +380957453177, vladscu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7415-7105

*O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
17 Chornohlazivska St., Kharkiv, 61002, Ukraine.*

Zubenko Denis, PhD (Engineering), Associate Professor, Physics and computer science teacher, +380505202101, Denis04@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-6736-7849
Municipal Institution "Kharkiv Lyceum No. 54 of the Kharkiv City Council"

4 Bohomoltsia St., Kharkiv, 61157, Ukraine.

Yemelianova Kateryna, PhD, Senior Lecturer of the Department of Urban Power Supply and Electricity Consumption Systems, +380639557630, Kateryna.Bukhanova@kname.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7319-9255

*O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
17 Chornohlazivska St., Kharkiv, 61002, Ukraine.*

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF COMPUTER TECHNOLOGIES IN ELECTRIC POWER ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS: FROM ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO QUANTUM COMPUTING

Abstract. The article analyzes modern computer and intelligent technologies in electric power engineering and electromechanics, including SCADA systems, IoT, digital twins, AI methods, and the prospects of quantum computing. Their advantages for forecasting and control are identified, and the main limitations of practical implementation are outlined.

Keywords: electric power engineering, electromechanics, artificial intelligence, IoT, quantum computing, forecasting, electric drive control.

Вступ. У сучасному світі розвиток електроенергетики та електромеханіки нерозривно пов'язаний із стрімким прогресом комп'ютерних технологій, цифрових методів обробки даних та інтелектуальних систем керування [1]. Ускладнення структури електроенергетичних систем, зростання частки відновлюваних джерел енергії, широке впровадження електроприводів з частотним регулюванням швидкості, а також жорсткі вимоги до енергоефективності та надійності зумовлюють необхідність використання новітніх обчислювальних підходів і алгоритмів [2].

Огляд останніх досягнень в галузі штучного інтелекту. Перспективними напрямками розвитку комп'ютерних технологій в електроенергетиці та електромеханіці є застосування методів штучного інтелекту, аналізу великих даних, Інтернету речей (IoT) та дослідження потенціалу квантових обчислень. Ці технології відіграють ключову роль у прогнозуванні електричних навантажень і генерації, діагностиці технічного стану обладнання, оптимальному керуванні електромеханічними системами та підвищенні надійності електроенергетичних мереж [3].

Останніми роками методи штучного інтелекту активно інтегруються в процеси експлуатації, планування та управління електричними системами. У роботах [4, 5] наведено огляди застосування машинного й глибокого навчання в інтелектуальних електромережах, зокрема для прогнозування навантажень, оптимізації розподілу енергії, діагностики обладнання та інтеграції відновлюваних джерел. Водночас зазначається, що більшість AI-моделей потребує великих і якісних наборів даних, тоді як у реальних умовах дані часто є неповними або зашумленими, що знижує точність прогнозів [4].

У низці досліджень підтверджено ефективність AI-методів для прогнозування генерації та навантажень, оцінювання стійкості мереж і виявлення несправностей [6]. Разом із цим наголошується на низькій інтерпретованості моделей і високій залежності результатів від якості вхідних даних, що обмежує їх використання в критично важливих енергосистемах та ускладнює пояснення прийнятих рішень.

Окремі дослідження присвячені виявленню аномалій і локалізації дефектів у даних електроенергетичних систем із використанням AI [7, 8], а в електромеханіці – прогнозуванню відмов і діагностиці електричних машин за допомогою нейронних мереж та автоенкодерів [9]. Такі підходи забезпечують високу точність, проте характеризуються значною обчислювальною складністю, ризиком перенаванчання та труднощами впровадження в системи реального часу [10].

Подальший розвиток галузі пов'язаний з упровадженням IoT у розумні мережі. Попри здатність ML-моделей обробляти великі обсяги даних із розподілених сенсорів, залишаються проблеми надійності комунікацій, неоднорідності даних, інтеграції пристроїв і кібербезпеки [11, 12]. Таким чином, незважаючи на значний потенціал комп'ютерних технологій – від AI до квантових обчислень – їх практичне застосування супроводжується низкою наукових і прикладних викликів, пов'язаних з інтерпретованістю моделей, якістю даних, обчислювальними ресурсами та безпекою.

Метою дослідження є аналіз перспектив розвитку комп'ютерних технологій в електроенергетиці та електромеханіці, зосереджений на оцінці можливостей і обмежень застосування методів штучного інтелекту, машинного та глибокого навчання, а також визначенні напрямів подальшого розвитку, включно з використанням квантових обчислень у задачах моделювання, оптимізації та керування енергетичними системами.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Проаналізувати сучасні комп'ютерні та інтелектуальні технології, що застосовуються в електроенергетиці та електромеханіці, з позиції їх практичного використання для аналізу режимів роботи, прогнозування та керування технічними системами.

2. Оцінити інженерний потенціал використання IoT-технологій для моніторингу, діагностики та підвищення надійності розумних електромереж і електромеханічних комплексів.

3. Розглянути перспективи застосування квантових і гібридних обчислювальних підходів для розв'язання задач оптимізації, планування та керування в електроенергетиці та електромеханіці.

Дослідження поєднує аналітичні, математичні, комп'ютерні та інтелектуальні методи для вивчення розвитку комп'ютерних технологій в електроенергетиці та електромеханіці – від класичних цифрових методів до штучного інтелекту та квантових обчислень.

Основним підходом є систематичний аналіз наукових джерел щодо застосування машинного та глибокого навчання, великих даних і Інтернету Речей для прогнозування електричних навантажень, діагностики стану обладнання, виявлення аномалій та оптимального управління енергосистемами. Виявлено ключові обмеження сучасних методів: залежність від якості даних, низька інтерпретованість моделей, проблеми масштабованості та складності впровадження.

Емпірична частина базується на аналізі даних IoT сенсорів у енергетичних та електромеханічних системах. Дані обробляються методами статистики, кластеризації, автоенкодерів та алгоритмами виявлення аномалій для оцінки ефективності масштабованих систем моніторингу в умовах розподілених джерел інформації.

Аналіз режимів роботи та прогнозування в електроенергетиці та електромеханіці. Оцінка стану генераторів, трансформаторів та ліній передачі здійснюється за допомогою SCADA-систем, що збирають дані в реальному часі, візуалізують параметри обладнання та виявляють аномалії. Дані інтегруються у системи управління енергетичними мережами (EMS) для комплексного моніторингу та контролю. У практиці українських енергомереж SCADA застосовується для моніторингу навантажень високовольтних ліній, стабільності роботи підстанцій та швидкого реагування на аварійні ситуації. SCADA також

збирає статистику експлуатаційних режимів обладнання для прогнозування та аналізу ефективності мережі [13].

Для підвищення точності оцінки стану застосовують поєднання класичних статистичних методів із нейронними мережами. Гібридні моделі на базі EEMD та BiLSTM підвищують ефективність виявлення аномалій у SCADA-даних вітрових електростанцій та дозволяють прогнозувати короткострокові несправності, підвищуючи надійність системи [14].

Цифрові двійники створюють віртуальні копії турбогенераторів, насосно-турбінних установок та вітрових ферм, оцінюють вплив навантажень, вібрацій, температур і режимів роботи на ресурс обладнання. Наприклад, цифровий двійник 320 МВт вугільної електростанції моделює теплові процеси, оптимізує роботу при різних навантаженнях і прогнозує ефективність ремонту та модернізації. Моделі також дозволяють імітувати сценарії відмов, оцінювати критичні точки та оптимізувати керування в реальному часі.

Прогнозування базується на історичних даних і математичних моделях для передбачення навантажень, вироблення енергії, ймовірності відмов та оптимального розподілу потужностей. Використовують методи машинного навчання (SVM, Random Forest, Naïve Bayes, XGBoost тощо), які дозволяють планувати технічне обслуговування до критичних ситуацій та зменшувати витрати на аварійні ремонти. Інтеграція з IoT-сенсорами та цифровими двійниками підвищує точність прогнозів.

Автоматизацію забезпечують PLC та DCS, що регулюють трансформаторні відгалуження, насосні станції, генератори та інші ключові вузли, оптимізуючи продуктивність і знижуючи енергетичні втрати. Нейронні контролери адаптують керування, наприклад, на вітрових фермах у Данії швидкість турбін змінюється залежно від вітру для максимального вироблення енергії та продовження ресурсу обладнання [15,16].

У Smart Grid відбувається автоматичне перерозподілення навантажень і балансування генерації та споживання, що запобігає перевантаженням, скорочує простої обладнання та підвищує стійкість мережі. Smart Grid також дозволяє

динамічне тарифування та інтеграцію відновлюваних джерел, підвищуючи енергоефективність і зменшуючи викиди CO₂ [17].

Інтернет речей та підключені пристрої як основа інтелектуальних кіберфізичних систем. IoT об'єднує фізичні об'єкти, сенсори, контролери та виконавчі пристрої в єдине інтегроване середовище з обміном даних у реальному часі, що дає змогу створювати інтелектуальні кіберфізичні системи для віддаленого збору, обробки інформації та прийняття управлінських рішень. В електроенергетиці IoT забезпечує моніторинг стану обладнання, діагностику несправностей, прогнозування технічного стану та оптимізацію енергоспоживання, де ключовими є надійність передачі даних, енергоефективність і безпека комунікацій [11].

Мережу IoT можна формалізувати як зважений граф $G(V, E)$,

де V – множина вузлів (сенсорів, контролерів, шлюзів), а E – множина каналів зв'язку між ними. Кожному ребру e_{ij} може бути поставлена у відповідність вага w_{ij} , що характеризує затримку, пропускну спроможність або надійність каналу. Такий підхід дозволяє аналізувати топологію мережі, оцінювати критичні вузли, оптимізувати маршрути передачі даних і прогнозувати аварійні режими у реальних електричних мережах.

Важливим є баланс енергії на вузлах мережі, особливо для автономних сенсорів:

$$E_i(t + 1) = E_i(t) + E_i^{gen}(t) - E_i^{cons}(t),$$

де E_i^{gen} – енергія, що генерується (наприклад, за рахунок енергозбирання), а E_i^{cons} – енергія, спожита на передачу та обробку даних.

Ці моделі дозволяють подовжити ресурс сенсорів і оптимізувати режими передачі даних. Для бездротових IoT-мереж застосовують модель «відстань–шум» для оцінки ймовірності успішної передачі та швидкості обміну, а протоколи RPL, MQTT і CoAP оптимізують передачу з урахуванням обмежених ресурсів вузлів [18, 19].

IoT широко використовується в енергетиці та промисловості, підвищуючи надійність, ефективність і гнучкість систем. В інтелектуальних електромережах IoT забезпечує моніторинг параметрів у реальному часі, виявлення відхилень,

прогнозування відмов і планування профілактичного обслуговування. Зокрема, у мікромережах IoT застосовується для інтеграції розподілених джерел енергії, управління піковими навантаженнями та підвищення стійкості систем, а поєднання сенсорів з алгоритмами машинного навчання підвищує точність прогнозів на 15–20 %.

У розумних будівлях IoT використовується для оптимізації енергоспоживання. Приклад смарт-кампусу в Іспанії демонструє зниження енергоспоживання на 18 % завдяки адаптивному регулюванню систем HVAC, освітлення та автоматичному перерозподілу навантажень [20].

У промисловості IIoT застосовують для діагностики та підвищення надійності електромеханічного обладнання, що дозволяє зменшити непланові простої, скоротити витрати електроенергії та підвищити ефективність технічного обслуговування [21]. Таким чином, математичні моделі IoT-мереж є основою для аналізу, оптимізації та практичного впровадження інтелектуальних систем у сучасній енергетиці та промисловості.

Квантові обчислення як перспективний напрям прогнозування та оптимізації. Квантові обчислення базуються на принципах суперпозиції та квантової запутаності, що дозволяє паралельно обробляти великі обсяги інформації на рівні, недоступному для класичних комп'ютерів. Це відкриває нові можливості для оптимізації багатовимірних параметрів і аналізу складних часових рядів. Зокрема, квантові обчислення є перспективними для оптимізації потоків потужності, зниження втрат енергії та підвищення стабільності мережі, а також для прогнозування часових рядів навантажень, включно з генерацією відновлюваних джерел, що дозволяє адаптувати роботу енергосистеми в реальному часі [22].

Інтеграція квантових методів із класичними моделями застосовується для управління складними електромеханічними системами, оптимізації роботи генераторів, трансформаторів, електроприводів і насосно-турбінних установок. Фундаментальні квантові алгоритми, зокрема алгоритми Дойча–Джоза та Шора, демонструють потенціал швидкого розв'язання задач пошуку й факторизації, адаптованих до енергетичних систем. Прикладні гібридні підходи, такі як

варіаційний алгоритм власних значень (VQE), поєднують квантові обчислення з методами штучного інтелекту та машинного навчання для розв'язання оптимізаційних задач у реальному часі [23].

Попри активну стадію розвитку універсальних квантових комп'ютерів, провідні наукові центри та корпорації (IBM Quantum, Google Quantum AI, Rigetti, D-Wave Systems) зосереджуються на створенні квантових процесорів і гібридних моделей, у яких квантові обчислення виступають прискорювачем класичних AI-алгоритмів, підвищуючи точність і продуктивність прогнозів.

Таким чином, квантові обчислення розглядаються як перспективний інструмент інтелектуальних енергетичних систем майбутнього, здатний підвищити ефективність управління, зменшити втрати енергії, покращити стійкість мереж і забезпечити адаптивне керування складними технологічними процесами.

Результати та обговорення. У статті проведено комплексний аналіз сучасних комп'ютерних, інтелектуальних і математичних методів, що застосовуються в електроенергетиці. Розглянуто системи моніторингу та управління (SCADA, EMS), цифрові двійники, IoT-технології, методи машинного й глибокого навчання, великі дані та перспективи квантових і гібридних обчислень, які активно впроваджуються в задачах керування електроприводами промислових механізмів, транспортних засобів і робототехнічних систем.

Дослідження показало, що сучасні підходи дозволяють оцінювати стан генераторів, трансформаторів і ліній передачі в реальному часі, а також технічний стан електродвигунів, силових перетворювачів та систем керування електроприводом. Це забезпечує оперативне виявлення відхилень у режимах роботи, прогнозування аварійних ситуацій (перегрів, вібрації, перевантаження, дефекти ізоляції) та підвищення надійності електромеханічних систем. Методи статистичного аналізу, нейронні мережі й гібридні алгоритми забезпечують прогнозування навантажень і технічного стану обладнання, сприяючи плануванню профілактичного обслуговування, скороченню простоїв і витрат на аварійні ремонти.

Цифрові двійники та автоматизовані контролери підвищують ефективність управління електромеханічними системами шляхом імітації режимів роботи, оцінки впливу навантажень, вібрацій і температур та оптимізації експлуатації. Інтелектуальні кіберфізичні системи на базі IoT забезпечують комплексний моніторинг, діагностику й прогнозування стану розподілених енергосистем, автоматичний перерозподіл навантажень, інтеграцію відновлюваних джерел та адаптивне управління мережами в реальному часі.

Аналіз виявив основні обмеження існуючих методів – залежність від якості даних, низьку інтерпретованість моделей і складність масштабування. Водночас поєднання математичного моделювання електромеханічних систем та динамічних моделей електропривода з AI-алгоритмами дозволяє отримувати високоточні прогнози й формувати ефективні стратегії керування швидкістю, моментом і енергоспоживанням електродвигунів.

Висновки з проведеного дослідження. У статті досягнуто поставленої мети – проведено аналіз сучасних комп'ютерних та інтелектуальних технологій у електроенергетиці та електромеханіці, включно з дослідженнями систем електропривода, методами штучного інтелекту, IoT, цифровими двійниками та перспективними квантовими обчисленнями.

Інженерний потенціал досліджених технологій є значним: використання цифрових двійників, IoT та AI підходів дозволяє підвищити надійність, продуктивність і ефективність енергетичних та електромеханічних систем.

Перспективним напрямом є застосування квантових і гібридних обчислень для задач оптимізації, планування та керування. Квантові алгоритми здатні одночасно обробляти великі обсяги даних, підвищуючи ефективність розподілу потужності, прогнозування навантажень та інтелектуального керування складними електроприводними системами. Інтеграція класичних та квантових методів з AI дозволяє формувати гнучкі, високопродуктивні та інтелектуальні енергетичні системи майбутнього.

Отже, проведене дослідження підтверджує, що розвиток комп'ютерних технологій від класичних цифрових методів до штучного інтелекту та квантових обчислень відкриває нові можливості для підвищення ефективності, надійності та

адаптивності електроенергетичних і електромеханічних систем та сучасних систем електропривода.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Syu J.-H., Srivastava G., Fojcik M., Cupek R., Lin J. C.-W. Artificial intelligence techniques in smart grid: A survey // *Computers and Electrical Engineering*. 2023. Ст. 108639. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2023.108639.
2. Amer Mousa H., Ali B. M. The AI powered grid: A systematic review of machine learning for optimization and resilience in smart energy systems // *International Journal of Engineering and Computer Science*. 2025. Vol. 14, No. 11. P. 27873–27880. DOI: 10.18535/ijecs.v14i11.5308.
3. Xu L. A review of three methods of artificial intelligence in smart grid cyber security: Machine learning, reinforcement learning, ensemble methods // *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2024. DOI: 10.54097/79xf0y91.
4. Deokar S. A., Wankhede P. S., Khandait S. P. Applications of artificial intelligence and machine learning in smart grid systems: A comprehensive review // *ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts*. 2023. Vol. 4, No. 2. P. 1–15. DOI: 10.29121/shodhkosh.v4.i2.2023.4825.
5. Amer Mousa H., Ali B. M. The AI-powered grid: A systematic review of machine learning for optimization and resilience in smart energy systems // *International Journal of Engineering and Computer Science*. 2025. Vol. 14, No. 11. P. 27873–27880. DOI: 10.18535/ijecs.v14i11.5308.
6. Zhang Y., Wang J., Zhao B. Deep learning methods utilization in electric power systems: A comprehensive review // *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. P. 1148–1165. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.01.265.
7. Li X., Chen H., Zhang D. Artificial intelligence–based anomaly detection and fault location in power grid indicator data: A review // *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 15. Art. 3747. DOI: 10.3390/en17153747.
8. Yu C., Anderson E. A review of artificial intelligence techniques for anomaly detection in smart grid // *Artificial Intelligence Review*. 2026. Vol. 69. P. 1–33. DOI: 10.1007/s10462-025-11429-x.
9. Benbouzid M. E. H., Boudjema Z., Kheloui A. Artificial intelligence applications in predicting faults in electrical machines: A review // *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 7. Art. 1616. DOI: 10.3390/en18071616.
10. Ahmad T., Chen H., Guo Y. Machine learning applications for IoT-integrated modern power systems: A review // *Electric Power Systems Research*. 2020. Vol. 189. Art. 106694. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106694.
11. Khan R., Javaid N., Alrajeh N. Vulnerability of machine learning approaches applied in IoT-based smart grids // *arXiv preprint*. 2023. arXiv:2308.15736.
12. Bhuiyan T. AI in smart grid cybersecurity: A systematic review of machine learning and deep learning approaches against false data injection and other emerging attacks // *Journal of Computer Science and Technology Studies*. 2025. Vol. 7, No. 8. P. 1207–1295.
13. Oyedotun S. A., Oise G. P., Ozobialu C. E. Towards intelligent cybersecurity in SCADA and DCS environments: Anomaly detection using multimodal deep learning and explainable AI // *Journal of Science Research and Reviews*. 2025. DOI: 10.70882/josrar.2025.v2i3.76.
14. Zhang Y., Wang J., Liu H., Li X. Anomaly detection of wind farm SCADA data based on EEMD and BiLSTM // *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 16. Art. 5869. DOI: 10.3390/en15165869.
15. Digital twin in energy industry: Proposed robust digital twin for power plant and other complex capital-intensive large engineering systems // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 3704–3726. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.02.305.
16. Baradaran M. Predictive maintenance of electric motors using supervised learning models: A comparative analysis // *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2504.03670.

17. Fraunhofer ISE. Smart grids and distributed energy management [Електронний ресурс]. 2022. Режим доступу: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-topics/smart-grid.html> (дата звернення: 2026).
18. Xu X., Li X., Zhang W., Yang L. T. Resource allocation and signal transmission in IoT networks // *IEEE Internet of Things Journal*. 2018. Vol. 5, No. 6. P. 4401–4413. DOI: 10.1109/IIOT.2018.2867569.
19. Дерев'янюк Д., Перегуда О. Особливості побудови систем smart-моніторингу Microgrid систем // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2024. № 1. С. 75. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2024.298816.
20. Smith J., García P. Is IoT monitoring key to improve building energy efficiency? Case study of a smart campus in Spain // *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 285. Art. 112882. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.112882.
21. Юшук І. В., Юшук П. О. Використання промислового Інтернету речей (IIoT) для оптимізації енергоефективності на підприємствах // *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 4. С. 39–45. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-4-19.
22. Qiu S., Zheng S., Qiu D. Revisiting Deutsch–Jozsa algorithm // *Information and Computation*. 2020. Vol. 275. Art. 104605. DOI: 10.1016/j.ic.2020.104605.
23. Peruzzo A., McClean J., Shadbolt P., Yung M. H., Zhou X. Q., Love P. J., O'Brien J. L. A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor // *Nature Communications*. 2014. Vol. 5. Art. 4213. DOI: 10.1038/ncomms5213.

REFERENCES:

1. Syu J.-H., Srivastava G., Fojcik M., Cupek R., Lin J. C.-W. Artificial intelligence techniques in smart grid: A survey // *Computers and Electrical Engineering*. 2023. Ст. 108639. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2023.108639.
2. Amer Mousa H., Ali B. M. The AI powered grid: A systematic review of machine learning for optimization and resilience in smart energy systems // *International Journal of Engineering and Computer Science*. 2025. Vol. 14, No. 11. P. 27873–27880. DOI: 10.18535/ijecs.v14i11.5308.
3. Xu L. A review of three methods of artificial intelligence in smart grid cyber security: Machine learning, reinforcement learning, ensemble methods // *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2024. DOI: 10.54097/79xf0y91.
4. Deokar S. A., Wankhede P. S., Khandait S. P. Applications of artificial intelligence and machine learning in smart grid systems: A comprehensive review // *ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts*. 2023. Vol. 4, No. 2. P. 1–15. DOI: 10.29121/shodhkosh.v4.i2.2023.4825.
5. Amer Mousa H., Ali B. M. The AI-powered grid: A systematic review of machine learning for optimization and resilience in smart energy systems // *International Journal of Engineering and Computer Science*. 2025. Vol. 14, No. 11. P. 27873–27880. DOI: 10.18535/ijecs.v14i11.5308.
6. Zhang Y., Wang J., Zhao B. Deep learning methods utilization in electric power systems: A comprehensive review // *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. P. 1148–1165. DOI: 10.1016/j.egy.2023.01.265.
7. Li X., Chen H., Zhang D. Artificial intelligence-based anomaly detection and fault location in power grid indicator data: A review // *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 15. Art. 3747. DOI: 10.3390/en17153747.
8. Yu C., Anderson E. A review of artificial intelligence techniques for anomaly detection in smart grid // *Artificial Intelligence Review*. 2026. Vol. 69. P. 1–33. DOI: 10.1007/s10462-025-11429-x.
9. Benbouzid M. E. H., Boudjema Z., Kheloui A. Artificial intelligence applications in predicting faults in electrical machines: A review // *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 7. Art. 1616. DOI: 10.3390/en18071616.
10. Ahmad T., Chen H., Guo Y. Machine learning applications for IoT-integrated modern power systems: A review // *Electric Power Systems Research*. 2020. Vol. 189. Art. 106694. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106694.

11. Khan R., Javaid N., Alrajeh N. Vulnerability of machine learning approaches applied in IoT-based smart grids // *arXiv preprint*. 2023. arXiv:2308.15736.
12. Bhuiyan T. AI in smart grid cybersecurity: A systematic review of machine learning and deep learning approaches against false data injection and other emerging attacks // *Journal of Computer Science and Technology Studies*. 2025. Vol. 7, No. 8. P. 1207–1295.
13. Oyedotun S. A., Oise G. P., Ozobialu C. E. Towards intelligent cybersecurity in SCADA and DCS environments: Anomaly detection using multimodal deep learning and explainable AI // *Journal of Science Research and Reviews*. 2025. DOI: 10.70882/josrar.2025.v2i3.76.
14. Zhang Y., Wang J., Liu H., Li X. Anomaly detection of wind farm SCADA data based on EEMD and BiLSTM // *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 16. Art. 5869. DOI: 10.3390/en15165869.
15. Digital twin in energy industry: Proposed robust digital twin for power plant and other complex capital-intensive large engineering systems // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 3704–3726. DOI: 10.1016/j.egy.2022.02.305.
16. Baradaran M. Predictive maintenance of electric motors using supervised learning models: A comparative analysis // *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2504.03670.
17. Fraunhofer ISE. Smart grids and distributed energy management [Електронний ресурс]. 2022. Режим доступу: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-topics/smart-grid.html> (дата звернення: 2026).
18. Xu X., Li X., Zhang W., Yang L. T. Resource allocation and signal transmission in IoT networks // *IEEE Internet of Things Journal*. 2018. Vol. 5, No. 6. P. 4401–4413. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2867569.
19. Derevianko D., Pehuda O. (2024). Features of building smart monitoring systems for Microgrid systems. *Energy: Economics, Technology, Ecology*, 1, 75. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.298816>
20. Smith J., García P. (2023). Is IoT monitoring key to improving building energy efficiency? Case study of a smart campus in Spain. *Energy and Buildings*, 285, Article 112882. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112882>
21. Yushchuk I. V., Yushchuk P. O. (2025). The use of the Industrial Internet of Things (IIoT) to optimize energy efficiency at enterprises. *Scientific Journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences*, 4, 39–45. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-19>
22. Qiu S., Zheng S., Qiu D. (2020). Revisiting the Deutsch–Jozsa algorithm. *Information and Computation*, 275, Article 104605. <https://doi.org/10.1016/j.ic.2020.104605>
23. Peruzzo A., McClean J., Shadbolt P., Yung M. H., Zhou X. Q., Love P. J., O’Brien J. L. (2014). A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor. *Nature Communications*, 5, Article 4213. <https://doi.org/10.1038/ncomms5213>

Стаття надійшла до редакції: 18.10.2025; рецензування: 22.10.2025;

прийнята до публікації 05.11.2025. Автори прочитали і дали згоду рукопису.

The article was submitted on 18.10.2025; revised on 22.10.2025; and accepted for publication on 05.11.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.