

**М. С. Слизькоухий
К. О. Шквира
В. В. Мартинюк**

Сучасні напрямки застосування штучного інтелекту в електроенергетичних системах

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі представлено огляд сучасних напрямків застосування методів штучного інтелекту (ШІ) в електроенергетичних системах. Розглянуто ключові методології ШІ, такі як машинне навчання, нейронні мережі та експертні системи. Проаналізовано основні сфери їх практичного використання, зокрема для прогнозування генерації відновлюваних джерел енергії та попиту на електроенергію, оптимізації режимів роботи електромереж, а також для інтелектуального моніторингу та предиктивної діагностики стану енергетичного обладнання. Визначено основні переваги використання ШІ та перспективні напрямки подальших досліджень у цій галузі.

Ключові слова :штучний інтелект, електроенергетичні системи, машинне навчання, нейронні мережі, прогнозування, оптимізація, діагностика, відновлювані джерела енергії, розумні мережі.

Abstract

The paper provides an overview of modern applications of artificial intelligence (AI) methods in power engineering systems. Key AI methodologies, such as machine learning, neural networks, and expert systems, are considered. The main areas of their practical use are analyzed, particularly for forecasting renewable energy generation and electricity demand, optimizing power grid operation modes, as well as for intelligent monitoring and predictive diagnostics of power equipment status. The main advantages of using AI and promising areas for further research in this field are identified.

Keywords :artificial intelligence, power engineering systems, machine learning, neural networks, forecasting, optimization, diagnostics, renewable energy sources, smart grids.

Вступ

Сучасні електроенергетичні системи (ЕЕС) зазнають значних трансформацій, пов'язаних із широким впровадженням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), розвитком розподіленої генерації та зростанням вимог до ефективності й надійності енергопостачання. Ці зміни створюють складні виклики, такі як управління нестабільними енергопотоками, забезпечення балансу потужності та підтримка стабільності мережі. В таких умовах методи штучного інтелекту (ШІ) виступають ключовим інструментом для модернізації ЕЕС, відкриваючи нові можливості для аналізу даних, прогнозування, оптимізації процесів та автоматизації управління.[2]

Інтелектуальні підходи на базі ШІ спрямовані на суттєве підвищення надійності, ефективності та безпеки функціонування енергосистем. Вони дозволяють мінімізувати втрати енергії, оптимізувати інтеграцію ВДЕ, підвищити стабільність мереж шляхом своєчасного виявлення та запобігання потенційним аварійним ситуаціям, а також сприяють зниженню експлуатаційних витрат.[1]

Метою даної доповіді є огляд основних методів штучного інтелекту та напрямків їх застосування для вирішення актуальних завдань в сучасних електроенергетичних системах, базуючись на аналізі актуальних досліджень.

Огляд методів штучного інтелекту, що використовуються в енергетиці

Для вирішення завдань в електроенергетиці застосовується низка підходів на основі ШІ, які можна умовно поділити на декілька категорій:

Машинне навчання (Machine Learning, ML)

Ця категорія методів дозволяє комп'ютерним системам навчатися на основі даних без явного програмування кожного кроку. ML алгоритми виявляють закономірності у великих масивах даних і використовують їх для прогнозування або прийняття рішень[2]:

- Навчання з учителем (Supervised Learning): Модель навчається на розмічених даних (де відомі правильні відповіді). Застосовується для задач регресії (прогнозування числових значень, наприклад, обсягу генерації) та класифікації (визначення категорії, наприклад, типу несправності).
- Навчання без учителя (Unsupervised Learning): Модель працює з нерозміченими даними, самостійно знаходячи в них структуру (наприклад, кластеризація споживачів за профілями споживання, виявлення аномалій).
- Навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL): Агент навчається приймати послідовні рішення шляхом взаємодії з середовищем та отримання "винагород" або "штрафів" за свої дії. Перспективне для задач адаптивного керування енергосистемами.

Штучні нейронні мережі (Artificial Neural Networks, ANN) та Глибоке навчання (Deep Learning, DL)

ШНМ є обчислювальними моделями, натхненними структурою та функціонуванням біологічних нейронних мереж[4]. Вони складаються з взаємопов'язаних "нейронів", організованих у шари. Глибоке навчання – це підрозділ ML, що використовує ШНМ з великою кількістю шарів (глибокі нейронні мережі) для вивчення складних ієрархічних представлень даних. DL особливо ефективно для аналізу часових рядів (наприклад, LSTM, для прогнозування), обробки зображень (наприклад, CNN для інспекції ліній електропередачі) та моделювання надзвичайно складних нелінійних залежностей.[2-3]

Експертні системи (Expert Systems, ES)

ЕС імітують процес прийняття рішень людиною-експертом у певній вузькій галузі.[4] Вони складаються з бази знань (факти, правила, евристики, отримані від експертів) та механізму логічного виведення, який використовує ці знання для вирішення конкретних проблем. В енергетиці ЕС можуть використовуватися для діагностики несправностей за відомими симптомами, планування ремонтів або підтримки прийняття рішень операторами.

Нечітка логіка (Fuzzy Logic, FL)

Нечітка логіка дозволяє працювати з нечіткими, неточними або лінгвістичними змінними (наприклад, "висока температура", "низький попит"). Вона використовує поняття ступеня належності до множини замість бінарної логіки "так/ні". Це робить FL корисною для моделювання систем, де присутня невизначеність, та для створення систем керування, що імітують людське мислення.[4]

Основні напрямки застосування ШІ в електроенергетиці

Застосування штучного інтелекту в електроенергетиці охоплює широкий спектр завдань, спрямованих на покращення ключових аспектів функціонування сучасних енергосистем. Інтелектуальні технології допомагають вирішувати проблеми, пов'язані з прогнозуванням, оптимізацією процесів, моніторингом та діагностикою.[2] Розглянемо основні напрямки:

Прогнозування параметрів енергосистеми

1. Прогнозування генерації ВДЕ

Методи ML, особливо нейронні мережі (наприклад, LSTM), широко використовуються для прогнозування виробітку сонячних та вітрових електростанцій на основі метеорологічних даних та історичних показників. Це дозволяє зменшити невизначеність та оптимізувати інтеграцію ВДЕ.[2-3]

2. Прогнозування попиту на електроенергію

Алгоритми ML та DL аналізують історичні дані споживання, погодні умови, календарні фактори для прогнозування навантаження на різних часових інтервалах, що є критично важливим для забезпечення балансу потужності та надійності системи.[2]

3. Прогнозування цін на електроенергію

Моделі на основі ML (наприклад, нейронні мережі) допомагають учасникам ринку прогнозувати цінові коливання, що сприяє ефективнішій торгівлі та управлінню витратами.[3]

Оптимізація режимів роботи та управління енергосистемами

1. Оптимальний потік потужності (OPF)

Сучасні підходи, такі як глибоке навчання з підкріпленням (DRL), використовуються для динамічного управління потоками потужності в реальному часі, що дозволяє мінімізувати втрати, підтримувати рівні напруги та підвищувати загальну стійкість "розумних мереж".[2]

2. Управління накопичувачами енергії та мікромережами

Інтелектуальні алгоритми оптимізують цикли заряду/розряду накопичувачів, координують роботу розподілених джерел енергії в мікромережах та віртуальних електростанціях для підвищення їх ефективності та надійності.

Інтелектуальний моніторинг, діагностика стану обладнання та забезпечення якості

1. Предиктивне обслуговування

Методи ML (наприклад, нейронні мережі, метод опорних векторів) аналізують дані з датчиків (наприклад, аналіз розчинених газів в маслі для трансформаторів) для раннього виявлення потенційних несправностей та планування обслуговування до виникнення критичних відмов.[3]

2. Виявлення та класифікація збурень якості електроенергії

Алгоритми, такі як згорткові нейронні мережі (CNN) та рекурентні нейронні мережі (LSTM), використовуються для автоматичного розпізнавання та класифікації різних типів збурень якості електроенергії, що дозволяє оперативно вживати заходів для їх усунення.

3. Підвищення безпеки та стійкості

ШІ використовується для аналізу стійкості системи в реальному часі, виявлення каскадних аварій та розробки стратегій для їх запобігання.

Перспективи розвитку

Подальший розвиток ШІ в електроенергетиці спрямований на створення ще більш інтелектуальних та автономних систем. Важливими трендами є розробка пояснюваного ШІ (XAI), що дозволить підвищити довіру до рішень, прийнятих машинами. Очікується поглиблення інтеграції ШІ з Інтернетом речей (IoT) для збору більш детальних даних, та з граничними обчисленнями (Edge Computing) для швидкої обробки інформації безпосередньо на об'єктах. Створення цифрових двійників (Digital Twins) енергетичних активів відкриває можливості для точного моделювання, тестування та оптимізації їх роботи в реальному часі. Також перспективними є федеративне навчання для безпечної роботи з розподіленими даними та блокчейн-технології для захищених транзакцій. Актуальними напрямками досліджень залишаються оптимізація мереж з високою часткою ВДЕ та накопичувачів, а також розробка гібридних алгоритмів прогнозування.[2]

Висновок

Методи штучного інтелекту демонструють свою високу ефективність та стають невід'ємною частиною модернізації електроенергетичних систем. Вони пропонують потужні інструменти для вирішення ключових завдань у сфері прогнозування, оптимізації режимів роботи, моніторингу стану обладнання та забезпечення якості електроенергії. Огляд сучасних досліджень, зокрема за 2023-2024 роки, підтверджує значний прогрес та високий потенціал ШІ для підвищення ефективності, надійності та стійкості сучасного енергопостачання. Успішне майбутнє інтелектуальної енергетики залежить від спільних зусиль науковців, інженерів, операторів систем та регуляторів, спрямованих на подолання існуючих викликів та розвиток міждисциплінарної співпраці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1.Інтегровані інтелектуальні енергосистеми на базі ШІ: технології, архітектури, виклики та напрямки досліджень - Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115251> (Автори : Alam, M. M., Hossain, M. J., Habib, M. A., Arafat, M. Y., & Hannan, M. A) .
- 2.Застосування методів штучного інтелекту та оптимізації в сучасній електроенергетиці: загальний огляд - Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/2/516> (Автори: Pijarski, P., & Belowski, A.).
- 3.Штучний інтелект в експлуатації, керуванні та плануванні електроенергетичних систем: оглядовий аналіз - Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1093/ce/zkad061> (Автори: Pandey, U., Pathak, A., Kumar, A., & Mondal, S.).
- 4.Ключові методології штучного інтелекту для застосування в електроенергетичних системах - Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/370706198_Methodologies_of_Artificial_Intelligence_in_Power_System (Автор: Tiwari, S.)

Слизькоухий Максим Сергійович — студент групи 1KN-24Б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: Slizkoyxiumaks@gmail.com

Шквира Каріна Олександрівна — студентка групи 1KN-24Б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: shkvyra.karina@gmail.com

Науковий керівник: Мартинюк Володимир Валерійович— канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: gyravl6@gmail.com

Slizkouchyi Maksym S. – student of group 1KN-24B, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Slizkoyxiumaks@gmail.com

Shkvyra Karina O. – student of group 1KN-24B, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: shkvyra.karina@gmail.com

Scientific advisor: Martyniuk Volodymyr V. – Candidate of Philology tech. Sciences, Associate Professor of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: gyravl6@gmail.com