

Науковий керівник:
Вахоніна Л.В.
Канд. фіз.-мат. наук, доцент
кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Миколаївський національний аграрний університет

УДК 004.89:621.311.1

ЗАСТОСУВАННЯ ГЛИБИННИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У РОЗПОДІЛЕНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМАХ

Дмитро Кошкін
канд. техн. наук, доцент Миколаївський національний аграрний
університет
м. Миколаїв, Україна

Анотація: У тезах досліджено використання методів штучного інтелекту (ШІ) для підвищення ефективності процесів розподілу електроенергії та ідентифікації вразливих місць в електроенергетичних мережах. Показано, що за умов зростання частки відновлюваних джерел енергії, активної цифровізації та посилення кіберзагроз класичні централізовані системи керування потоками потужності виявляються малопридатними для оперативної адаптації до змін режимів. Обґрунтовано застосування алгоритмів машинного й глибокого навчання для задач прогнозування навантаження, оптимізації схем енергорозподілу та інтелектуальної діагностики аномальних режимів з метою завчасного виявлення технічних відмов і потенційних кібератак. Розглянуто переваги й обмеження централізованих, децентралізованих і гібридних структур керування, а також висвітлено можливості блокчейн-технологій і смартконтрактів для забезпечення прозорості, простежуваності й захисту транзакцій в енергомережах. Виокремлено основні чинники, що визначають результативність моделей ШІ в енергетиці (повнота й якість даних, обчислювальний ресурс, рівень зашумлення сигналів, стійкість до кіберзагроз), та окреслено перспективні напрями розвитку гібридних інтелектуальних систем керування електроенергетичними мережами.

Ключові слова: оптимізація розподілу електроенергії; методи штучного інтелекту; прогнозування електричних навантажень; виявлення аномальних режимів; електроенергетичні мережі; блокчейн-технології; гібридні системи управління.

Сучасні електроенергетичні системи працюють в умовах зростання попиту на електроенергію, активного впровадження відновлюваних джерел та глибокої цифрової трансформації енергетичної інфраструктури. Така комбінація факторів призводить до ускладнення топології мереж, підвищення вимог до надійності,

гнучкого перерозподілу потужності та підсилення вимог до кіберстійкості. Класичні централізовані системи диспетчерського управління, що спираються на традиційні методи оптимізації, не завжди забезпечують достатню швидкодію та адаптивність у разі різких змін генерування й навантаження, а також при появі нових типів кібератак.

Метою дослідження є розроблення та теоретичне обґрунтування інтелектуальних підходів до оптимізації розподілу електроенергії й підвищення кіберстійкості енергетичних мереж на основі технологій штучного інтелекту. Для її досягнення виконано аналіз актуальних наукових праць щодо застосування ШІ в енергетиці (керування режимами, прогнозування навантажень, забезпечення кібербезпеки), проведено оцінювання ефективності алгоритмів машинного та глибинного навчання у задачах розподілу енергії, виявлення аномалій та протидії зовнішнім і внутрішнім загрозам, а також визначено перспективи й бар'єри впровадження інтелектуальних технологій з огляду на технічні, економічні та безпекові обмеження.

Методологічною основою роботи є поєднання теоретичного аналізу, математичного моделювання й алгоритмів ШІ. Оптимізація потоків потужності та розподілу ресурсів здійснювалася із застосуванням методів лінійного й нелінійного програмування з урахуванням обмежень пропускної здатності ліній, режимів роботи обладнання та варіативності споживання. Для задач прогнозування навантаження розглядалися як класичні підходи машинного навчання (лінійні та нелінійні регресії, дерева рішень, ансамблеві моделі), так і глибинні нейромережеві архітектури – насамперед рекурентні мережі типу LSTM і GRU, орієнтовані на обробку часових рядів електроспоживання.

Дослідження методів виявлення аномалій в електроенергетичних мережах засвідчило доцільність використання автоенкодерів, кластеризаційних алгоритмів та контекстно-орієнтованих підходів, що дають змогу ідентифікувати відхилення від нормального режиму роботи у масштабі, наближеному до реального часу. Показано, що різні класи методів пред'являють неоднакові вимоги до обсягу й репрезентативності вхідних даних, мають різну обчислювальну складність та точність локалізації аномалій. Зіставлення результатів демонструє, що глибинні нейромережі забезпечують вищу точність, проте потребують значних ресурсів, тоді як дерева рішень і ансамблеві алгоритми є швидкодіючими, але менш чутливими до складних нелінійних залежностей між параметрами режиму.

Окремо проведено аналіз стратегій організації керування енергетичними мережами. Централізовані схеми з єдиним центром прийняття рішень забезпечують цілісне бачення стану енергосистеми, але недостатньо масштабуються, ускладнюють інтеграцію розподіленої генерації й суттєво залежать від людського чинника. Децентралізовані підходи передбачають автономну роботу локальних вузлів і мікромереж на основі агентних систем та технологій Інтернету речей, що підвищує гнучкість і відмовостійкість, проте створює додаткові виклики для координації на рівні всієї енергосистеми.

Як компроміс запропоновано гібридні структури керування, у яких централізовані модулі ШІ виконують прогнозування навантаження та глобальну оптимізацію режимів, тоді як локальні вузли приймають оперативні рішення з

урахуванням місцевих вимірювань. У таких системах доцільно застосовувати блокчейн-технології та смартконтракти для захищеного обліку електроенергії, автоматизованих взаєморозрахунків між виробниками та споживачами і мінімізації ризиків несанкціонованих змін даних. Поєднання блокчейну з алгоритмами машинного навчання дає змогу одночасно підвищити прозорість, кіберзахищеність та адаптивність функціонування енергомереж.

До ключових факторів, які визначають ефективність застосування ІІІ в енергетиці, віднесено: обсяг і повноту історичних баз даних; періодичність оновлення інформації; рівень шумів та наявність аномальних спостережень; коректний вибір типу алгоритму й його гіперпараметрів; доступність обчислювальних ресурсів; можливість інтеграції з наявною інфраструктурою; нормативні вимоги та стандарти кіберзахисту. Ігнорування цих чинників може спричинити деградацію точності прогнозів, помилкові керуючі дії та підвищення вразливості до атак на дані.

Результати дослідження підтверджують, що впровадження інтелектуальних технологій у системи керування розподілом електроенергії дає змогу: підвищити точність коротко-, середньо- та довгострокових прогнозів навантаження; скоротити технічні втрати та покращити енергетичну ефективність режимів роботи мереж; забезпечити своєчасне виявлення аномальних режимів, технічних відмов і потенційних кібератак; формувати адаптивні, самоналаштовувані енергосистеми з підвищеною стійкістю до зовнішніх і внутрішніх впливів.

Водночас успішна реалізація таких рішень пов'язана з необхідністю подолання проблем масштабування моделей, високої обчислювальної вартості глибинних нейромереж, організації надійної інфраструктури збору даних і суворого дотримання вимог кібербезпеки. Подальші дослідження доцільно спрямувати на створення самонавчальних гібридних систем керування, здатних ефективно функціонувати в умовах швидкої зміни конфігурації енергомереж, зростання частки відновлюваних джерел енергії та посилення кіберзагроз.

Список використаних джерел

1. Sadovoy, O., Koshkin, D., Martynenko, V., & Sokolik, V. (2025). Electricity generation from biogas: Modern technologies and prospects for Ukraine's energy independence. *Machinery & Energetics*, 16(1), 173-185. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.173>
2. Ahmad N., Ghadi Y., Adnan M., Ali M. Load forecasting techniques for power system: research challenges and survey. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 71054–71090. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3187839.
3. Aslam S., Herodotou H., Mohsin S.M., Javaid N., Ashraf N., Aslam S. A survey on deep learning methods for power load and renewable energy forecasting in smart microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 144. Art. 110992. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110992.
4. Khan A.A., Laghari A.A., Rashid M., Li H., Javed A.R., Gadekallu T.R. Artificial intelligence and blockchain technology for secure smart grid and power distribution automation: a state-of-the-art review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023. Vol. 57. Art. 103282. DOI: 10.1016/j.seta.2023.103282.

5. Method for evaluating the stability of arc burning of electrodes with rutile-cellulosic covering / O. Kostin et al. 2022 IEEE 4th international conference on modern electrical and energy system (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 20–23 October 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/mees58014.2022.10005682> (date of access: 23.11.2025).

Abstract. The paper summarises the possibilities of applying artificial intelligence (AI) methods to improve energy distribution efficiency and enhance vulnerability detection in power networks. The limitations of traditional centralised control approaches under the conditions of increasing renewable energy penetration, large-scale digitalisation and growing cyber threats are outlined. The use of machine learning and deep learning algorithms for load forecasting and optimisation of power flows is substantiated, as well as intelligent anomaly detection techniques for timely identification of technical faults and potential cyberattacks. The advantages and disadvantages of centralised, decentralised and hybrid control models are analysed, with particular attention to the role of blockchain technologies and smart contracts in ensuring transparency and security of operations. Key factors influencing the effectiveness of AI models in energy networks – data quality, computational resources, noise level and cyber-resilience – are highlighted, and directions for further development of hybrid intelligent control systems are defined.

Keywords: load forecasting; digital transformation; microgrids; risk assessment; neural network models; anomaly detection; blockchain.