

Волошинов С.А.

доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії, Херсонський державний аграрно-економічний університет, Херсон
voloshynov_s@ksaeu.kherson.ua

ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ В ЕНЕРГЕТИЦІ

Вступ. Розгортання четвертої промислової революції (Індустрії 4.0) кардинально змінило суспільство, запустивши тотальну цифровізацію практично до всіх сфер нашого життя. Для українського енергетичного сектору цей етап збігся з періодом масштабної та складної трансформації в умовах війни з росією. Перехід на відновлювані джерела енергії (ВДЕ), стрімке зростання частки розподіленої малої генерації, поява нових гравців на ринку, постійні руйнування елементів енергетичної інфраструктури, а також активне впровадження систем накопичення енергії та віртуальних електростанцій (VPP) — усе це вимагає принципово нових підходів до керування мережею.

За таких умов саме цифрові технології стають фундаментом для стабільної та надійної роботи вітчизняної енергосистеми. Інтеграція цифрових моделей, потокових даних та алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) є необхідною умовою побудови стійкої, гнучкої та економічно ефективною енергетичної системи України. Завдяки масовому поширенню технологій Інтернету речей (IoT), алгоритмів штучного інтелекту та систем онлайн-моніторингу, ми отримуємо принципово нові інструменти для побудови інтелектуальних систем управління мережею.

Застосування штучного інтелекту та технологій машинного навчання дає змогу формувати цифрові електростанції, розумні мережі та цифрові двійники. Вивчення тем з адаптивного навантаження, цифрових електростанцій, розумних мереж та цифрових двійників є сучасними, дуже важливими, але достатньо важкими до засвоєння здобувачами. Тому використання під час навчання штучного інтелекту, цифрових та імерсивних технологій суттєво допомагає здобувачам в отриманні цих знань та у подальшому їх використанні на робочому місці.

Основна частина. Нова парадигма трансформації енергетики це перехід від традиційних лінійних систем до «Розумних мереж» (Smart Grids). Історично електроенергетичні системи будувалися за лінійним принципом: велика централізована генерація (АЕС, ТЕС, ГЕС) передавала потужність через магістральні та розподільчі мережі до пасивного кінцевого споживача [1]. Інтеграція технологій Індустрії 4.0 в енергетику породила 3D концепцію: декарбонізацію — зменшення використання викопного палива, децентралізацію — побудову розумних мереж (Smart Grids) та енергетичного Інтернету (Internet of Energy) [2].

Енергосистема нового покоління базується на чотирьох фундаментальних принципах:

1. Децентралізація: інтеграція великої кількості розподілених джерел енергії (РДЕ), таких як сонячні та вітрові електростанції, що розташовані безпосередньо біля споживачів.

2. Цифровізація: переведення всіх виробничих, диспетчерських та комерційних процесів у цифровий формат за допомогою потокових даних.

3. Інтелектуалізація: використання алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування генерації, споживання та автоматичного управління балансом системи.

4. Активний споживач (Prosumer): перетворення колишнього пасивного клієнта на активного учасника ринку, який може не лише споживати, а й виробляти, накопичувати (за допомогою систем ESS) та продавати електроенергію назад у мережу [3].

За таких умов традиційне керування мережею стає неможливим. Величезний масив нових суб'єктів вимагає автоматизованих систем управління конфігурацією мережі, здатних адаптувати топологію ліній у режимі реального часу задля мінімізації втрат та запобігання аваріям.



Рис. 1. Архітектура інтелектуальної мережі яка керується ШІ.

Завдяки хмарним технологіям велика кількість розрізнених малих виробників та систем накопичення енергії об'єднуються в єдиний цифровий кластер. VPP управляється ШІ та діє на ринку як одна потужна, стабільна електростанція, згладжуючи піки споживання [4].

Розумна мережа (Smart Grid) є кіберфізичною системою. Це означає, що фізичний рівень (лінії електропередачі, підстанції) та цифровий рівень (алгоритми, хмарні платформи, канали зв'язку) злиті в єдине ціле. Будь-яка зміна у фізичному світі миттєво відображається у цифровому середовищі, цифровому двійнику мережі, де прораховуються тисячі варіантів топології і найкраще рішення повертається у вигляді команди на виконавчі органи (керувані вимикачі, реклоузери) [5].



Рис. 2. Структура цифрового двійника в енергетиці.

Впровадження цифрових двійників (Digital Twins) надає можливість створити віртуальні динамічні копії реальних об'єктів інфраструктури: трансформаторних та розподільчих підстанцій, турбін, ділянок мережі та аналізувати їх стан онлайн за допомогою IoT-датчиків.

Адаптивне управління конфігурацією — це комплекс організаційно-технічних заходів та інтелектуальних алгоритмів, спрямованих на динамічну зміну топологічної структури мережі (схеми з'єднання ліній, трансформаторів, систем розподілу) та параметрів її режимів роботи задля досягнення оптимального функціонування. На відміну від автоматичного регулювання (наприклад, підтримки рівня напруги за допомогою трансформаторів), адаптивне управління діє на вищому, системному рівні [6].



Рис. 3. Адаптивне управління навантаженням.

Сучасна мережа дуже інерційна, вона не може швидко реагувати на динамічні зміни, а реагує лише за фактом події. Адаптивне управління повинно діяти на випередження. Використовуючи алгоритми машинного навчання (ML), система аналізує історичні дані, прогнози погоди та графіки споживання електроенергії споживачами, щоб передбачити дефіцит або профіцит потужності на кілька годин уперед і завчасно змінити конфігурацію мережі.



Рис. 4. Предиктивне обслуговування енергообладнання.

Це дозволяє керувати навантаженням в режимі реального часу, уможлиблює перехід від ремонтів «за регламентом» до прогностичного технічного обслуговування (Predictive Maintenance), що знижує витрати на ремонти до 30% та запобігає аваріям [7].

Цифрова трансформація енергетики України висуває принципово нові вимоги до людського капіталу. Сучасний інженер-енергетик більше не є виключно технічним спеціалістом, який працює з механічним чи електричним обладнанням. Він має володіти компетентностями на стику енергетики, ІТ та аналізу даних. Випускники університетів повинні вміти взаємодіяти з кіберфізичними системами, програмувати режими роботи інтелектуальних систем управління, зчитувати дані з цифрових двійників та приймати рішення на основі рекомендацій штучного інтелекту [8].

Однією з головних вимог енергетичних компаній до операторів мереж є високий рівень цифрової компетентності. Сучасна енергосистема генерує великі масиви даних (Big Data) завдяки розумним лічильникам, IoT-датчикам та системам онлайн-моніторингу. Відповідно, інженер-енергетик повинен володіти компетентностями збору, обробки та аналізу цієї інформації.

Наступний етап цифровізації електроенергетичного комплексу пов'язаний із переходом до ще більшого рівня автономності енергетичних систем. Ключовим трендом стає впровадження концепції «пояснюваного ШІ» (XAI). Це критично важливо для інженерів та диспетчерів, адже дає змогу чітко розуміти логіку алгоритмів і суттєво підвищує рівень довіри до автоматизованих рішень ШІ. Без цього неможливо делегувати машині керування критично важливими вузлами, де будь-яка помилка загрожує системною аварією. Паралельно відбувається синергія нейромереж із технологіями Інтернету речей (IoT) для збору максимально детальної телеметрії, а також із периферійними обчисленнями. Обробка сигналів безпосередньо на інтелектуальних датчиках підстанцій мінімізує затримки в передачі даних і дозволяє реагувати на загрози за над короткий проміжок часу.

Особливе місце посідає проектування цифрових двійників (Digital Twins) реальних активів, що уможлиблює точне віртуальне моделювання та оптимізацію процесів у реальному часі. Для безпечного аналізу усе частіше

залучають децентралізовані блокчейн-платформи. Така комбінація технологій створює стійкий імунітет проти кібератак і маніпуляцій із комерційними даними.

Висновки. Аналіз сучасних науково-практичних розробок доводить, що інтелектуальні системи вже стали базовим фундаментом для масштабної модернізації енергетичного сектору. Вони забезпечують інженерів надійними інструментами для прогнозування генерації, стабілізації робочих режимів, ранньої діагностики стану обладнання та контролю параметрів навантаження. Фактично, ми спостерігаємо зміну парадигми від реактивного усунення наслідків аварій до проактивного запобігання їм.

Водночас пріоритетними науковими задачами залишаються балансування мереж із високою концентрацією об'єктів ВДЕ та промислових накопичувачів, а також створення комбінованих (гібридних) моделей прогнозування.

Результати досліджень чітко підтверджують колосальний потенціал інтеграції ШІ та цифрових двійників у розбудові гнучких, стійких та ефективних енергосистем України.

Список використаної літератури.

1. Siemens Energy. The future of energy: Energy 4.0 White Paper. – Munich: Siemens AG, 2023. – 35 p. – Режим доступу: <https://www.siemens-energy.com> (дата звернення: 21.04.2026).
2. Лібанова Е. М., Підлісецький І. В. Енергетика 4.0: нова парадигма для майбутнього / Український інститут майбутнього. – Київ: UIF, 2021. – 112 с.
3. Xu, X., Liu, C., Zhang, Z., Xu, W., Cai, Y. Digital Twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop / X. Xu, C. Liu, Z. Zhang, W. Xu, Y. Cai // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – 2021. – Vol. 12. – P. 10041–10053. – DOI: 10.1007/s12652-021-03170-4.
4. Штучний інтелект в енергетиці : аналіт. доповідь / Суходоля О. М. – К. : НІСД, 2022. – 49 с. – <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.09>
5. Qi, Q., Tao, F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison / Q. Qi, F. Tao // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 3585–3593. – DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2793265
6. OECD Framework for the Classification of AI Systems. OECD Digital Economy Papers. February 2022. № 323. P. 80.
6. Policy Guidance for Smart, Energy-Saving Consumer Devices / IEA. URL: https://www.iea-4e.org/wpcontent/uploads/publications/2020/12/Policy_Guidance_for_Smart_Energy_Saving_Consumer_Devices_May_2020.pdf
7. Next-Gen Industrial AI Energy Sector / Siemens. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:fef90d09-6876-4510-b29b-bb6d60374793/siemens-nextgen-industrial-ai-energy-sector.pdf>
8. Лійчук, Л. (2024). Штучний інтелект і якість освіти: можливості, виклики та загрози. Науково-педагогічні студії, (8), 232-248. <https://doi.org/10.32405/2663-5739-2028-8-232-248>