

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-14>

УДК 621.548:004.738.5:004.89

С. В. Сиротюк¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-9966-6299

О. Г. Скляр², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0456-2479

В. В. Пташник¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1018-1138

В. В. Климчук¹, аспірант

ORCID: 0009-0000-6332-7869

Г. Валовські³, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-0866-4368

¹ Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. Гжицького² Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного³ Інститут технологій і наук про життя – Національний науково-дослідний інститут

e-mail: ptashnykproject@gmail.com

ЧОТИРИРІВНЕВА АРХІТЕКТУРА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ДЛЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ: МОНІТОРИНГ, ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ З МЕРЕЖЕЮ

Анотація. У статті розглянуто, що таке Інтернет речей, як функціонують вітрові електростанції та чому доцільно інтегрувати IoT із відновлюваною енергетикою. Висвітлено моніторинг робочих параметрів вітрових турбін, автоматизацію й оптимізацію процесів, а також прогнозування відмов і предиктивне технічне обслуговування. Наведено приклади систем вітрових електростанцій, у яких використовується Інтернет речей, а також технології та платформи, що застосовуються для моніторингу. На основі визначення викликів і обмежень, пов'язаних з управлінням даними, окреслено перспективи розвитку Інтернету речей у вітроенергетиці.

Ключові слова: IoT, відновлювана енергетика, турбіна, вітрові електростанції, штучний інтелект, офшорна енергетика.

Постановка проблеми. Інтернет речей (Internet of Things, IoT) передбачає інтеграцію фізичних пристроїв – таких як датчики, машини та системи керування – з інформаційно-телекомунікаційними мережами з метою збирання, обміну та аналізу даних, а також реагування на них у режимі реального часу. Завдяки мініатюризації датчиків, розвитку бездротового зв'язку та штучного інтелекту IoT забезпечує створення інтелектуальних систем, здатних до самодіагностики, прогнозування подій і оптимізації процесів.

Вітрові електростанції являють собою сукупність вітрових турбін, розміщених на одній території, які перетворюють кінетичну енергію вітру на електричну енергію. Окрема вітрова турбіна складається, зокрема, з ротора з лопатями, редуктора, генератора, системи керування та вежі. Вироблена електроенергія передається до електричної мережі та становить вагомую частку енергетичного балансу як на локальному, так і на глобальному рівнях [1].

Інтеграція технологій IoT з відновлюваними джерелами енергії, зокрема з вітроенергетичними установками, відкриває нові перспективи технологічного розвитку. Застосування IoT забезпечує безперервний моніторинг експлуатаційних параметрів турбін, раннє виявлення відмов і впровадження предиктивного технічного обслуговування, що дає змогу суттєво знизити експлуатаційні витрати та подовжити термін служби обладнання. Крім того, IoT сприяє кращій інтеграції вітрових електростанцій із розумними електромережами, підвищуючи стабільність мережі та ефективність використання відновлюваних джерел енергії.

Формулювання мети статті. Метою статті є розгляд інтеграції технологій Інтернету речей у вітроенергетичні системи з позицій уніфікованої чотирирівневої архітектури та висвітлення її можливостей для моніторингу, оптимізації роботи турбін, технічного обслуговування й інтеграції з електромережею.

У межах даного дослідження інтеграція технологій IoT у вітроенергетичні системи розглядається з позицій уніфікованої чотирирівневої архітектури, сформованої на основі зростання складності керування, часових горизонтів ухвалення рішень і масштабу інтеграції з фізичною енергетичною системою. Запропоновані рівні відображають послідовний перехід від моніторингу й реактивного керування в режимі реального часу (рівень 1) до адаптивного та предиктивного керування (рівень 2), далі – до системної оптимізації на рівні парку вітрових турбін (рівень 3) і, зрештою, до стратегічної інтелектуальності, орієнтованої на життєвий цикл активів, кіберфізичну безпеку та довгостроковий вплив (рівень 4). Така декомпозиція дозволяє чітко відокремити якісно різні класи задач і водночас застосувати єдину концептуальну рамку до аналізу експлуатаційної продуктивності, технічного обслуговування та інтеграції вітроенергетичних систем у ширшу енергетичну та екологічну екосистему. Подальший виклад матеріалу структуровано відповідно до цієї чотирирівневої логіки, що дозволяє послідовно простежити еволюцію IoT-орієнтованих рішень – від базового збору даних до стратегічного керування вітроенергетичними активами.

Аналіз останніх досліджень. У сучасних вітрових електростанціях кожна турбіна оснащується багатосенсорними вимірювальними системами [2]. Типовий набір датчиків (табл. 1) включає:

- акселерометри, які контролюють вібрації та відхилення ротора, ідентифікують механічні резонанси, фіксують аномальні коливання та забезпечують прогнозування відмов підшипників і валів;
- тензодатчики, що вимірюють напруження в лопатях і вежі турбіни та дають змогу виявляти структурні пошкодження;
- датчики температури та вологості, призначені для моніторингу генератора, підшипників і систем охолодження, а також для захисту електронних компонентів і лопатей;
- анемометри, системи LiDAR та SODAR, які вимірюють швидкість і напрямок вітру, впливаючи на оптимізацію кута атаки лопатей і прогнозування режимів роботи вітрової турбіни.

Таблиця 1

Типовий набір сенсорів, що використовується в сучасних вітрових турбінах

Тип датчика	Вимірюваний параметр	Призначення
Акселерометри	Вібрації	Прогнозування відмов підшипників і валів
Тензодатчики	Деформація, напруження	Моніторинг лопатей і вежі, виявлення структурних пошкоджень
Анемометри	Швидкість і напрямок вітру	Оптимізація кута атаки лопатей
Термопари	Температура	Контроль перегріву компонентів
Датчики вологості	Атмосферна вологість	Захист електроніки та лопатей
LiDAR / SODAR	Профілювання вітру та турбулентність	Прогнозування режимів роботи вітрової турбіни

Зібрані дані в режимі реального часу передаються до локальних або хмарних систем для подальшого аналізу. Інтеграція технологій IoT із системами керування SCADA забезпечує повну автоматизацію роботи вітрових турбін і сприяє адаптації системи до змінних погодних умов. На практиці така інтеграція підтримує динамічне регулювання кута повороту лопатей і частоти обертання ротора залежно від варіабельності вітрового потоку. Вона також дає змогу автоматично перемикаєти режими роботи (наприклад, запуск або зупинку турбіни) з урахуван-

ням метеорологічних умов і технічного стану обладнання, що сприяє оптимізації виробництва електроенергії та мінімізації зношування компонентів. Крім того, реалізується віддалене керування та діагностика: оператор може дистанційно контролювати й коригувати експлуатаційні параметри, тоді як автоматизовані системи здатні виявляти аномалії та забезпечувати швидше визначення потенційних несправностей.

Удосконалені алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту дедалі частіше застосовуються для аналізу даних, отриманих від вітрових турбін, з метою оптимізації їхньої роботи. Такі моделі опрацьовують дані з датчиків, прогнози вітрових умов і історичні експлуатаційні дані, що дає змогу прогнозувати обсяги виробництва електроенергії, виявляти зниження ефективності та завчасно передбачати необхідність виконання ремонтних робіт.

З використанням сучасних моделей машинного навчання стає можливим прогнозування залишкового ресурсу ключових компонентів турбіни, зокрема підшипників і редукторів. На основі аналізу попередніх і поточних даних сенсорів такі моделі здатні ідентифікувати характерні закономірності, що свідчать про наближення відмов.

Крім того, поєднання цифрових двійників із технологіями IoT забезпечує створення віртуальних моделей вітрових турбін, які відтворюють їхню поведінку в режимі реального часу. Інтеграція даних від IoT-датчиків із такими моделями дає змогу здійснювати прогнозування відмов, оптимізувати експлуатаційні параметри та планувати технічне обслуговування.

Основна частина. Інтеграція технологій IoT у вітрові турбіни забезпечує вагомі технічні та економічні переваги, які доцільно поділити на три основні групи:

- експлуатаційна продуктивність та енергоефективність;
- технічне обслуговування, надійність і безпека;
- координація з електромережею та екологічна аналітика.

На рис. 1 показано ключові напрями, у яких технології IoT сприяють розвитку та підвищенню ефективності вітрових електростанцій.

Експлуатаційна продуктивність та енергоефективність становлять базову категорію переваг, що забезпечуються впровадженням технологій IoT у системах вітроенергетики. У межах уніфікованої багаторівневої архітектури ці переваги реалізуються через послідовне впровадження дедалі більш розвинених рівнів вимірювання, адаптації, системної оптимізації та стратегічного керування. Головною метою на всіх рівнях є максимізація виробництва електроенер-

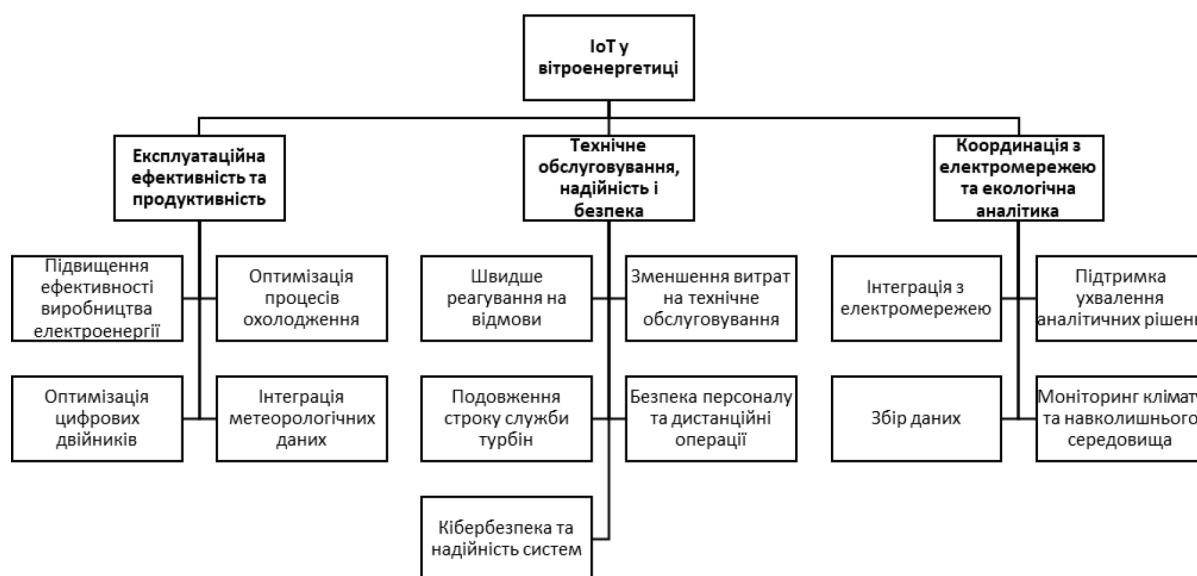


Рис. 1. Основні напрями застосування IoT у системах вітроенергетики

гії за умови забезпечення стабільної роботи турбін в умовах постійно змінного навколишнього середовища.

На базовому рівні (рівень 1) IoT-системи забезпечують безперервний контроль ключових експлуатаційних параметрів, зокрема швидкості вітру, кута повороту лопатей, частоти обертання ротора, рівня вібрацій та внутрішніх температур. Оперативний збір даних у режимі реального часу уможливорює реалізацію зворотного зв'язку, що дозволяє турбінам динамічно регулювати кут установки лопатей, орієнтацію по вітру (yaw-керування) та активацію систем охолодження у відповідь на короткочасні коливання вітрових умов. Такий замкнений контур керування забезпечує роботу поблизу оптимальних точок енергоефективності за одночасного зменшення механічних навантажень.

Подальший розвиток IoT-орієнтованого керування (рівень 2) пов'язаний з урахуванням впливу навколишнього середовища та переходом від реактивних до адаптивних і предиктивних стратегій. Якщо для малопотужних наземних турбін із номінальною потужністю до 1 МВт пасивне охолодження залишається достатнім, то для більш потужних установок – особливо морських вітрових електростанцій, що працюють у вологих кліматичних умовах, – необхідним є застосування активних систем охолодження [3]. Системи охолодження, підсилені технологіями IoT, використовують безперервні вимірювання температури та вологості для динамічного регулювання інтенсивності охолодження, що дає змогу зменшити допоміжне енергоспоживання та обмежити зношування компонентів, спричинене термічними циклами. Стратегії керування з урахуванням погодних умов додатково підтримують адаптивну поведінку турбін, дозволяючи прогнозувати зміни середовища, а не лише реагувати на них.

На етапі системної оптимізації (рівень 3) ключову роль відіграють цифрові двійники, які забезпечують створення віртуального представлення окремих вітрових турбін або цілих вітрових електростанцій. Завдяки використанню безперервно оновлюваних даних від сенсорів цифрові двійники уможливають високоточне моделювання поведінки турбін за різних стратегій керування. Оператори можуть оцінювати вплив змін кута повороту лопатей, кута орієнтації по вітру або частоти обертання ротора на вироблення електроенергії, навантаження на компоненти та накопичення втомних пошкоджень без ризику для фізичного обладнання. Цей рівень забезпечує узгоджену оптимізацію взаємодії кількох підсистем, на відміну від ізолюваного налаштування окремих параметрів.

На найвищому рівні абстракції (рівень 4) IoT-орієнтовані системи зосереджуються на забезпеченні довготривалої енергоефективності та керуванні, орієнтованому на повний життєвий цикл обладнання. Поєднуючи результати моніторингу в режимі реального часу, адаптивного керування та моделювання на основі цифрових двійників, IoT-системи підтримують стратегічне ухвалення рішень, спрямоване на збереження високої ефективності протягом усього терміну експлуатації турбін. На цьому рівні цілі оптимізації зміщуються від миттєвих показників продуктивності до забезпечення довгострокового енергетичного виходу, надійності та збереження вартості активів.

Категорія технічного обслуговування, надійності та безпеки ґрунтується на експлуатаційних рівнях і розширює функціональні можливості IoT у напрямі проактивного зниження ризиків, подовження життєвого циклу обладнання та підвищення безпеки персоналу. У межах тієї самої чотирирівневої архітектури IoT-системи трансформують вітрові турбіни з об'єктів, що обслуговуються реактивно, у стійкі кіберфізичні системи, здатні завчасно прогнозувати відмови та мінімізувати експлуатаційні ризики.

На першому рівні системи контролю технічного стану на базі IoT здійснюють безперервне відстеження механічних і електричних показників, таких як рівень вібрацій, температура, стан мастильних матеріалів і стабільність електричної потужності. Алгоритми виявлення аномалій

аналізують ці потоки даних з метою раннього визначення відхилень від нормального режиму роботи. У відповідь системи керування можуть автоматично коригувати параметри турбіни – наприклад, змінювати кут атаки лопатей за наявності надмірних вібрацій – або повідомляти операторів про необхідність ручного втручання. Така здатність до швидкого реагування суттєво знижує ймовірність розвитку аварійних ситуацій.

Подальший розвиток IoT-орієнтованих підходів до технічного обслуговування пов'язаний із впровадженням предиктивних стратегій (рівень 2), що ґрунтуються на фактичному стані обладнання, а не на фіксованих регламентних інтервалах. Завдяки виявленню ранніх ознак зношування або деградації IoT-системи дозволяють планувати обслуговування лише за необхідності, зменшуючи непродуктивні простої та оптимізуючи розподіл ресурсів. Зокрема, безперервний контроль рівня та якості мастила забезпечує раннє виявлення витоків, запобігаючи вторинним пошкодженням критично важливих компонентів. Такий підхід, орієнтований на фактичний стан, безпосередньо знижує витрати на технічне обслуговування та водночас підвищує коефіцієнт готовності вітрових турбін.

Із переходом до аналізу на рівні вітрової електростанції (рівень 3) технічний стан обладнання розглядається в системному контексті, охоплюючи весь парк турбін і пов'язані з ним процеси технічного обслуговування. Агреговані дані, зібрані з кількох установок, забезпечують можливість порівняльного аналізу надійності, виявлення системних закономірностей відмов і узгодженого планування сервісних робіт. Одночасно технології IoT сприяють підвищенню рівня безпеки персоналу, зменшуючи контакт із небезпечними умовами завдяки впровадженню предиктивного технічного обслуговування [4], а також забезпечуючи можливість дистанційних оглядів і супроводжуваних ремонтних операцій із використанням інтерфейсів доповненої реальності. Такі можливості є особливо важливими для морських вітрових електростанцій і об'єктів, розташованих на значній висоті.

У довгостроковій перспективі (рівень 4) IoT-орієнтовані підходи до технічного обслуговування зосереджуються на забезпеченні стійкості системи та її кіберфізичної безпеки. Хоча механізми шифрування й автентифікації забезпечують захист каналів зв'язку IoT, фізична інфраструктура залишається вразливою до зовнішніх втручань. Додатковий рівень захисту формується завдяки сенсорно-орієнтованим методам виявлення аномалій, які дозволяють ідентифікувати нетипові режими вібрацій, температури або споживання енергії, що можуть свідчити про несанкціоноване втручання, крадіжку енергії або пошкодження обладнання. Кореляція даних від різних сенсорів дає змогу формувати ранні попередження та підвищувати загальний рівень кіберфізичної безпеки вітроенергетичних установок.

Категорія координації з електромережею та екологічної аналітики розширює багаторівневу IoT-архітектуру за межі окремих вітрових турбін і вітрових електростанцій у напрямі масштабних енергетичних систем та моніторингу навколишнього середовища. На цьому рівні вітрові електростанції, оснащені IoT-технологіями, функціонують як узгоджені елементи електроенергетичної мережі, водночас роблячи внесок у формування довгострокової екологічної аналітики.

IoT-системи агрегують експлуатаційні дані (рівень 1) від усіх вітрових турбін і пов'язаних з ними систем накопичення енергії в межах вітрової електростанції, забезпечуючи цілісне уявлення про поточні режими генерації та споживання. Об'єднання кількох генерувальних і накопичувальних активів в єдину IoT-мережу дозволяє передавати сенсорні дані до хмарних або периферійних платформ для колективного опрацювання. Така агрегація даних у реальному часі формує основу для узгодженого енергетичного керування та підвищує керованість процесів на рівні всієї електростанції.

Подальший розвиток цих підходів пов'язаний із використанням інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень для адаптивного диспетчерського керування енергопотоками

(рівень 2). Алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту аналізують агреговані масиви даних з метою динамічного регулювання потужності турбін, активації ємностей систем накопичення або перенаправлення згенерованої електроенергії до регіонів із підвищеним попитом [5]. Завдяки автоматизованим сповіщенням і показникам достовірності рішень процесу ухвалення управлінських рішень, які раніше вимагали тривалого ручного аналізу, можуть виконуватися протягом лічених хвилин.

За умов масштабної інтеграції вітрової генерації аналітичне та статистичне опрацювання безперервних потоків даних (рівень 3) від сотень або тисяч турбін набуває системного характеру. Показники швидкості вітру, кута повороту лопатей, рівня вібрацій і вироблюваної потужності створюють підґрунтя для координації процесів на рівні електромережі, виявлення довготривалих тенденцій і розпізнавання закономірностей, недоступних для аналізу на рівні окремої турбіни [6]. Отримані результати використовуються для порівняльної оцінки ефективності, ідентифікації системних неефективностей та впровадження удосконалень у конструкцію турбін і стратегії їх керування на основі даних.

У ширшій перспективі функціональність IoT-орієнтованих рішень виходить за межі оперативного керування електричною енергією та доповнюється екологічною й кліматичною аналітикою (рівень 4). Окрім мінімізації втрат електроенергії та подовження терміну служби вітрових турбін [7], вітрові електростанції з підтримкою IoT можуть функціонувати як розподілені платформи екологічного моніторингу. Дані щодо локальних кліматичних умов, якості повітря та динаміки екосистем використовуються для підтримки екологічних досліджень і формування політик у сфері охорони довкілля, посилюючи роль вітроенергетичної інфраструктури як елемента ширших систем кліматичного спостереження.

У табл. 2 наведено уніфіковану чотирирівневу IoT-архітектуру, застосовану до трьох функціональних доменів: експлуатаційної продуктивності та енергоефективності, технічного обслуговування, надійності й безпеки, а також координації з електромережею та екологічної аналітики. Кожен рівень відображає поступове підвищення рівня абстракції – від моніторингу й керування в режимі реального часу до стратегічної інтелектуальності та довгострокового системного впливу.

Промислові застосування IoT у вітроенергетиці. Наведені нижче промислові приклади ілюструють практичну реалізацію запропонованої чотирирівневої IoT-архітектури в реальних системах вітроенергетики. Ці кейси демонструють впровадження моніторингу та керування в режимі реального часу, адаптивного й предиктивного керування, системної оптимізації та стратегічної інтелектуальності на рівні масштабних вітрових електростанцій. Представлені платформи відрізняються архітектурними підходами та масштабом реалізації, проте в сукупності підтверджують життєздатність і ефективність IoT-орієнтованих рішень у сучасній вітроенергетичній інфраструктурі.

Компанія Siemens Gamesa експлуатує мережу глобальних центрів дистанційної діагностики, які здійснюють збирання та аналіз даних IoT-датчиків з понад 30 000 вітрових турбін у всьому світі. Основною метою цієї системи є забезпечення високого коефіцієнта готовності турбін і раннє виявлення механічної деградації шляхом безперервного моніторингу технічного стану та застосування розширених аналітичних методів.

На першому рівні датчики, встановлені на ключових компонентах турбіни – зокрема в гондолі, редукторі, генераторі та на лопатях, – безперервно вимірюють рівень вібрацій, температуру та електричну потужність. Збирання даних здійснюється з частотами дискретизації від часток герца до кількох герц залежно від типу контролюваного сигналу. Обмін даними між польовими пристроями та системами вищого рівня відповідає стандарту IEC 61400-25-1, який визначає моделі даних та інтерфейси для моніторингу й керування вітровими електростанціями, та реалізується з використанням протоколів Modbus і OPC UA.

Таблиця 2

Уніфікована чотирирівнева IoT-архітектура для систем вітроенергетики

Рівень	Експлуатаційна продуктивність та енергоефективність	Технічне обслуговування, надійність і безпека	Координація з електромережею та екологічна аналітика
Рівень 1. Моніторинг і керування в режимі реального часу	Моніторинг і керування кутом повороту лопатей, орієнтацією по вітру та системами охолодження на основі даних сенсорів окремої турбіни	Безперервний контроль технічного стану та швидке виявлення механічних або електричних аномалій з автоматичними механізмами реагування	Агрегація в режимі реального часу експлуатаційних даних з усіх турбін і систем накопичення енергії в межах вітрової електростанції
Рівень 2. Адаптивне та предиктивне керування	Стратегії керування з урахуванням погодних умов і адаптивне теплове керування на основі даних про навколишнє середовище	Предиктивне технічне обслуговування та обслуговування за фактичним станом, ініційоване ранніми індикаторами відмов	Підтримка прийняття рішень на основі штучного інтелекту для адаптивного диспетчерського керування та розподілу потужності
Рівень 3. Системна оптимізація та координація	Оптимізація роботи турбін і вітрових електростанцій на основі цифрових двійників із використанням віртуального моделювання	Оцінка надійності на рівні парку турбін, узгоджене планування технічного обслуговування та підтримка безпеки персоналу	Аналітика на рівні електромережі, масштабна оцінка ефективності та узгоджена взаємодія з електроенергетичною мережею
Рівень 4. Стратегічна інтелектуальність і довгостроковий вплив	Оптимізація енергоефективності, орієнтована на життєвий цикл, та максимізація довгострокового енергетичного виходу	Кіберфізична безпека, довготривала стійкість системи та зниження ризиків	Екологічна та кліматична аналітика, сформована на основі довгострокового збору екологічних даних

Другий рівень забезпечує адаптивне та предиктивне керування завдяки передаванню даних у режимі реального часу до центрів дистанційної діагностики через супутникові канали зв'язку, мережі 4G/5G або волоконно-оптичні лінії. На цьому етапі застосовуються аналітичні методи на основі штучного інтелекту для виявлення ранніх ознак зношування зубчастих передач, пошкодження підшипників або аномальних режимів роботи, що дозволяє планувати технічне обслуговування до виникнення відмов.

На третьому рівні централізована аналітика, реалізована в межах відкритої хмарної IoT-операційної системи MindSphere, підтримує системну оптимізацію на рівні всього парку турбін. Завдяки кореляції даних, отриманих від тисяч вітрових турбін, платформа забезпечує порівняльну оцінку продуктивності, розпізнавання типових шаблонів аномалій і узгоджене планування технічного обслуговування.

Зрештою, на четвертому рівні стратегічна інтелектуальність реалізується через довгострокову оптимізацію коефіцієнта готовності та керування активами, орієнтоване на повний життєвий цикл. Згідно з корпоративними звітами, застосування предиктивної аналітики на базі IoT дозволило зменшити кількість позапланових робіт з технічного обслуговування до 30 % та підвищити коефіцієнт готовності турбін до понад 98 %. Коефіцієнт готовності, який визначається як відсоток часу, протягом якого турбіна здатна виробляти електроенергію в межах свого робочого діапазону швидкостей вітру, безпосередньо впливає на доходи від продажу електроенергії та дотримання умов контрактів на сервісне обслуговування. Невиконання договірних показників готовності зазвичай призводить до фінансових санкцій для постачальників послуг, що робить оптимізацію доступності на основі IoT критично важливим чинником досягнення високої окупності інвестицій у проєктах вітрових електростанцій.

Платформа Predix є комплексним IoT-рішенням, призначеним для інтеграції даних від вітрових турбін, підстанцій і метеорологічних станцій у межах кількох вітрових електростанцій.

Архітектура платформи орієнтована на масштабованість, мінімальну затримку реагування та безшовну інтеграцію з наявними SCADA-інфраструктурами.

На першому рівні Predix агрегує експлуатаційні дані в режимі реального часу з розподілених пристроїв, зокрема сенсорів турбін, електричних підсистем і обладнання для моніторингу навколишнього середовища. При цьому використовуються SCADA-системи моніторингу та збору даних, що дозволяє зменшити складність системи та обмежити потребу в додаткових сенсорах контролю технічного стану, роблячи рішення економічно доцільним для масштабних впроваджень.

Другий рівень базується на використанні периферійних обчислень, у межах яких частина обробки даних виконується локально на edge-пристроях, а не виключно в централізованих хмарних середовищах. Такий підхід зменшує затримки передавання даних і забезпечує швидше реагування на аномальні режими роботи. Алгоритми машинного навчання аналізують сигнали вібрацій, стан мастильних матеріалів і характеристики електричного струму, застосовуючи класифікаційні моделі, зокрема Random Forest, XGBoost та k-nearest neighbors, для оцінювання технічного стану вітрових турбін [8].

На третьому рівні цифрові двійники виступають ключовим інструментом системної оптимізації. Віртуальні копії фізичних вітрових турбін створюються на основі історичних експлуатаційних даних і фізично обґрунтованих моделей. Такі цифрові двійники використовуються для моделювання режимів роботи, прогнозування відмов окремих компонентів і оптимізації графіків технічного обслуговування на рівні всього парку вітрових турбін. Оцінюючи різні сценарії експлуатації у віртуальному середовищі, інженери можуть визначати оптимальні стратегії заміни компонентів і мінімізувати простой ще до виникнення відмов [9].

Четвертий рівень розширює функціональні можливості платформи Predix у напрямі стратегічної координації з електромережею. Платформа підтримує інтеграцію з системами керування розумними електромережами, що забезпечує динамічне балансування енергопостачання шляхом коригування вихідної потужності вітрових електростанцій відповідно до коливань попиту. Така функціональність підвищує стабільність електромережі та дозволяє вітровим електростанціям діяти як активні учасники ширшої енергетичної системи, а не як ізольовані генерувальні об'єкти [10].

Окрім комплексних промислових платформ, у наземних і морських вітрових електростанціях широко застосовується низка спеціалізованих IoT-орієнтованих рішень для моніторингу та SCADA-систем. Такі системи зазвичай зосереджуються на окремих рівнях IoT-архітектури, передусім на моніторингу в режимі реального часу та предиктивному технічному обслуговуванні.

Системи Turbine Condition Monitoring забезпечують безперервний вібраційний моніторинг для виявлення дефектів і оцінювання технічного стану обладнання, пропонуючи масштабовані можливості обміну даними між вітровими електростанціями. OrbiSCADA є хмарним SCADA-рішенням, розробленим для моніторингу та керування турбінами компанії Vestas, яке підтримує візуалізацію виробничих даних, відстеження швидкості вітру, контроль частоти обертання, обробку аварійних повідомлень і аналіз історичних даних у межах єдиного програмного інтерфейсу. Система Vestas CMS інтегрує датчики вібрацій і стану мастила для виявлення широкого спектра механічних несправностей, забезпечуючи цілодобовий дистанційний моніторинг, формування звітів і генерацію аварійних сигналів з метою проактивного планування технічного обслуговування.

У сукупності наведені промислові реалізації демонструють, яким чином запропонована чотирирівнева IoT-архітектура втілюється на практиці в різноманітних системах вітроенергетики. Від моніторингу в режимі реального часу та адаптивної аналітики до оптимізації на рівні

парку турбін і стратегічної інтеграції з електромережею – розглянуті платформи підтверджують, що технології IoT відіграють ключову роль у підвищенні експлуатаційної ефективності, надійності та довгострокової стійкості сучасних вітрових електростанцій.

Хоча ці платформи значною мірою спираються на розширені аналітичні методи та машинне навчання, їхня ефективність зрештою залежить від коректного відображення фізичних процесів, зокрема аеродинамічних сил, що діють на ротор, теплової поведінки компонентів приводу та накопичення структурної втоми за умов змінної швидкості вітру. Це підкреслює важливість поєднання методів, заснованих на аналізі даних, із предметними знаннями в галузі вітроенергетичного машинобудування.

Архітектурні основи IoT-орієнтованих систем вітроенергетики. Сучасні вітроенергетичні системи на базі IoT спираються на багаторівневий технологічний стек, що інтегрує системи диспетчерського керування, розподілені обчислення, розширену аналітику та механізми безпечного обміну даними. Сукупно ці компоненти забезпечують моніторинг у режимі реального часу, предиктивне технічне обслуговування, масштабну оптимізацію та довгострокове стратегічне керування вітровими електростанціями. Відповідно до запропонованої чотирирівневої IoT-архітектури, у наступних підрозділах розглянуто ключові технологічні засади, що лежать в основі промислових реалізацій, описаних вище. Огляд основних архітектурних компонентів і допоміжних технологій, які використовуються в сучасних IoT-орієнтованих системах вітроенергетики, наведено на рис. 2.

На базовому рівні (рівень 1) системи диспетчерського керування та збору даних SCADA слугують основним інтерфейсом для моніторингу й керування вітровими турбінами. SCADA-системи збирають експлуатаційні сигнали, зокрема швидкість вітру, вироблювану потужність, температуру та частоту обертання, забезпечуючи дистанційний нагляд і базове виявлення аномалій. Хоча традиційно такі системи були орієнтовані на детерміноване керування та візуалізацію процесів, дані SCADA дедалі частіше повторно використовуються як вхідна інформація для моделей машинного навчання та хмарної аналітики, що розширює їхню функціональність за межі простого спостереження.

Для доповнення можливостей SCADA важливу роль відіграють периферійні обчислення, які стали ключовим чинником забезпечення низької затримки обробки даних. Виконуючи аналіз безпосередньо поблизу джерела даних – наприклад, у гондолі турбіни або локальному контр-

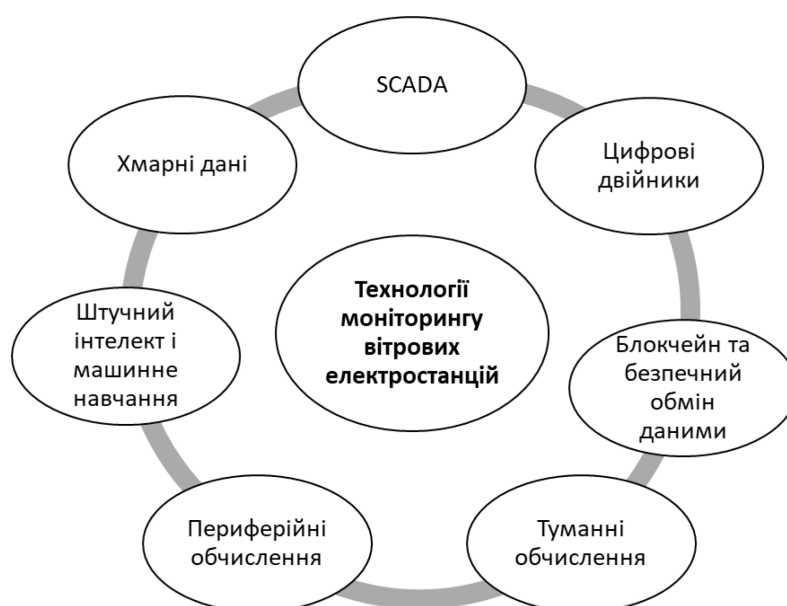


Рис. 2. Архітектурні компоненти та допоміжні технології IoT-орієнтованих систем вітроенергетики

олері, – edge-обчислення дозволяють швидко виявляти вібраційні аномалії чи короточасні відмови, одночасно зменшуючи затримки передавання та витрати на комунікацію. На практиці edge-пристрої часто функціонують у тісній взаємодії зі SCADA-системами, формуючи перший реактивний рівень IoT-орієнтованих архітектур вітрових електростанцій.

Поза межами безпосереднього керування адаптивні та предиктивні можливості реалізуються завдяки туманним обчисленням, які запроваджують проміжний рівень обробки даних (рівень 2) між edge-пристроями та централізованими хмарними платформами. Fog-вузли, що зазвичай розгортаються на підстанціях, морських платформах або в локальних центрах керування, агрегують і фільтрують дані від кількох турбін, виконують попередню аналітичну обробку та передають на вищі рівні лише ключові результати. Такий підхід дозволяє зменшити використання пропускну здатності мережі, енергоспоживання та експлуатаційні витрати, водночас підвищуючи рівень кібербезпеки та стійкості систем у географічно віддалених або морських вітрових електростанціях [11].

Однією з ключових цілей у fog-орієнтованих IoT-середовищах є мінімізація сумарного часу виконання завдань для застосунків реального часу за умови дотримання обмежень, пов'язаних з обчислювальними ресурсами, затримками та вимогами безпеки. Вибір між виконанням конкретного завдання на рівні fog-обчислень або його передаванням до хмарної інфраструктури є суттєвою оптимізаційною проблемою. Мобільність пристроїв, обмежена пропускна здатність периферійних каналів і жорсткі вимоги до безпеки можуть негативно впливати на затримки обробки даних, особливо в умовах динамічних режимів експлуатації.

Для подолання цих викликів було запропоновано вдосконалені стратегії планування завдань. У роботі [12] представлено алгоритм планування на основі нечіткої логіки, який обирає відповідні fog-обчислювальні вузли з урахуванням параметрів завдання, таких як обчислювальна складність, вимоги до зберігання даних, доступна пропускна здатність каналу, рівень безпеки та часові обмеження. Отримані результати свідчать, що одночасне врахування мережевої відстані та доступної пропускну здатності під час прив'язки IoT-пристроїв до fog-шлюзів дозволяє ефективніше скоротити час виконання завдань порівняно з підходами, заснованими лише на одному критерії.

На системному рівні (рівень 3) централізовані хмарні платформи даних виконують роль сховищ для різномірної інформації, що надходить з вітрових електростанцій, зокрема SCADA-вимірювань, височастотних потоків сенсорних даних і результатів інспекцій на основі зображень. Такі платформи забезпечують масштабну агрегацію даних, довготривале зберігання та масштабовану аналітику, формуючи основу для розширених систем підтримки прийняття рішень на базі штучного інтелекту.

Над хмарними IoT-інфраструктурами дедалі частіше функціонує спеціалізований аналітичний рівень на основі штучного інтелекту та машинного навчання. Алгоритми машинного навчання аналізують вібраційні сигнали, акустичні емісії, показники стану мастильних матеріалів і коливання потужності з метою виявлення ранніх ознак відмов або зниження експлуатаційної ефективності. Моделі глибинного навчання, навчені на історичних IoT-наборах даних, здатні розпізнавати тонкі часові та контекстні закономірності, які можуть бути недоступними для людських операторів або традиційних правил-орієнтованих систем.

У контексті вітроенергетичних систем оптимізація на системному рівні за своєю природою обмежується фізичними явищами, такими як аеродинамічні навантаження, структурна втома та термічні напруження в компонентах приводу. Зміни швидкості вітру та інтенсивності турбулентності спричиняють циклічні навантаження на лопаті, вежу та конструкції гондоли, прискорюючи втому матеріалів і впливаючи на довгострокову надійність обладнання. Інтеграція фізично обґрунтованих ознак – зокрема спектрів навантажень, вібраційних характерис-

тик і температурних градієнтів – у аналітику, засновану на даних, дозволяє IoT-орієнтованим оптимізаційним фреймворкам узгоджувати алгоритмічні рішення з реальними механічними процесами вітрових турбін, а не розглядати їх як абстрактні джерела даних.

У низці сучасних досліджень [13] наведено розширені підходи, що базуються на глибинних нейронних мережах і гібридних архітектурах автоенкодерів, які поєднують варіаційні автоенкодери, рекурентні мережі довготривалої короткочасної пам'яті та трансформерні моделі. Застосування таких методів забезпечує раннє виявлення аномалій – до 48 годин до фактичного виникнення відмови – шляхом аналізу багатовимірних часових рядів SCADA-даних. Інтегровані конвеєри інженерії ознак виділяють часові, статистичні та частотно-спектральні характеристики, що дозволяє надійно оцінювати рівень аномальності навіть за відсутності розмічених даних про відмови.

Пов'язана з цим проблема, розглянута в роботі [14], стосується недостатнього обсягу навчальних даних для нововстановлених вітрових турбін. Застосування методів генеративної доменної адаптації дозволяє зіставляти SCADA-дані від добре задокументованих машин із турбінами, що мають обмежену історію експлуатації, забезпечуючи повторне використання наявних діагностичних моделей і підвищуючи надійність виявлення відмов на ранніх етапах роботи.

На найвищому рівні абстракції (рівень 4) технології IoT підтримують стратегічну інтелектуальність завдяки використанню цифрових двійників і механізмів безпечного обміну даними. Цифрові двійники окремих турбін або цілих вітрових електростанцій поєднують фізично обґрунтовані моделі з даними сенсорів у режимі реального часу, що дає змогу здійснювати моделювання, прогнозування відмов і планування технічного обслуговування. Такі моделі є особливо цінними для вітроенергетичних систем, у яких значна мінливість вітрових умов істотно впливає на структурну цілісність, енергоефективність і довгострокові експлуатаційні характеристики.

Предиктивні цифрові двійники інтегрують розширену аналітику даних, статистичне та ймовірнісне моделювання, а також методи машинного навчання для завчасного передбачення потенційних проблем ще до їх фізичного прояву. У вітроенергетичних застосуваннях практична цінність цифрових двійників визначається явною інтеграцією фізичних моделей турбін, які описують аеродинамічну поведінку, структурну динаміку та теплові ефекти. Коливання навантажень, зумовлені вітром, взаємодія турбулентних слідів і температурозалежні властивості матеріалів суттєво впливають на ресурс турбін та їхню енергоефективність. Включення таких фізичних обмежень до моделей цифрових двійників забезпечує узгодженість предиктивної аналітики та стратегій оптимізації з реальними умовами експлуатації, а не лише зі статистичними кореляціями.

Така проактивна здатність сприяє оптимізації експлуатаційних характеристик, підвищує економічну доцільність та покращує надійність системи. Гібридні системи цифрових двійників на основі штучного інтелекту, які поєднують фізичне моделювання з навчанням на основі даних, додатково підвищують точність прогнозування відмов і рівень інтерпретованості результатів. У разі розгортання в межах хмарно-периферійних архітектур такі системи забезпечують масштабованість, низькі затримки та підтримку прийняття рішень у режимі реального часу, що робить їх придатними для керування розподіленими відновлюваними енергетичними ресурсами та їх інтеграції в інфраструктуру розумних електромереж. Відтак цифрові двійники розглядаються як наскрізна технологія, що охоплює рівні 3 і 4 запропонованої архітектури.

Паралельно з цим технологія блокчейн дедалі активніше досліджується як механізм безпечного й прозорого обміну IoT-даними між операторами вітрових електростанцій, диспетчерами електромереж і учасниками енергетичного ринку. Зберігання вимірювань сенсорів і даних про

виробництво електроенергії у розподілених реєстрах забезпечує цілісність даних, їхню простежуваність та автоматизоване виконання смартконтрактів без посередників. У поєднанні з даними IoT у режимі реального часу блокчейн-орієнтовані системи підвищують рівень прозорості та довіри у застосуваннях відновлюваної енергетики, підтримуючи прямий обмін електроенергією, виявлення шахрайства, верифікацію «зелених» сертифікатів і моніторинг внеску відновлюваних джерел у загальний енергетичний баланс.

У сукупності ці архітектурні та технологічні засади демонструють, яким чином IoT-орієнтовані системи вітроенергетики еволюціонують від диспетчерського керування в режимі реального часу до адаптивної інтелектуальності, масштабної оптимізації та стратегічної інтеграції в енергетичну екосистему. Узгоджуючи SCADA-системи, парадигми розподілених обчислень, аналітику на основі штучного інтелекту, цифрові двійники та механізми безпечного обміну даними в межах уніфікованої чотирирівневої архітектури, сучасні вітрові електростанції досягають підвищеної ефективності, надійності та довгострокової сталості.

Виклики та обмеження. Незважаючи на суттєві переваги, які забезпечують IoT-орієнтовані системи вітроенергетики, їх масштабне впровадження супроводжується низкою технічних, організаційних та економічних викликів. Ці обмеження зумовлені притаманною складністю вітроенергетики як кіберфізичної системи, у якій цифрова інфраструктура має надійно функціонувати в жорстких умовах навколишнього середовища, залишаючись при цьому тісно пов'язаною з фізичними процесами та обмеженнями електроенергетичної системи.

На базовому рівні моніторингу й керування в режимі реального часу однією з головних проблем є надійність сенсорів і якість даних. Вітрові турбіни працюють в умовах значних вібрацій, коливань температури, підвищеної вологості та механічних навантажень, що може призводити до деградації датчиків, зсуву калібрування або періодичної втрати даних. Неточні або зашумлені вимірювання безпосередньо впливають на керувальні рішення та знижують ефективність подальшої аналітичної обробки. Крім того, інтеграція різномірних сенсорів від різних виробників ускладнює гармонізацію даних і довгострокове обслуговування системи.

На вищих рівнях додатковими обмежувальними чинниками стають затримки передавання даних і обмежена пропускна здатність каналів зв'язку, особливо для морських вітрових електростанцій і географічно розподілених установок. Хоча edge- та fog-обчислення частково пом'якшують ці проблеми завдяки локальній обробці даних, питання визначення того, які дані доцільно обробляти локально, а які – передавати до централізованих хмарних платформ, залишається складною оптимізаційною задачею. Обмежена пропускна здатність, нестабільність мережі та мобільність окремих IoT-компонентів можуть негативно впливати на оперативність реагування в режимі реального часу й підвищувати складність системи. Додаткові обмеження пов'язані зі складністю оркестрації завдань між рівнями edge, fog і cloud, особливо за жорстких вимог до затримок і безпеки, що підкреслюється у сучасних дослідженнях з керування розподіленими IoT-ресурсами [15].

З позиції інформаційних технологій кібербезпека становить критичний виклик на всіх архітектурних рівнях. Вітрові електростанції, оснащені IoT-технологіями, мають значну поверхню атаки через використання розподілених пристроїв, бездротового зв'язку та механізмів віддаленого доступу. Хоча шифрування, автентифікація та захищені протоколи обміну даними знижують кіберризики, фізичний доступ до компонентів турбін і edge-пристроїв залишається вразливим місцем. Забезпечення наскрізної безпеки без внесення надмірних обчислювальних витрат або затримок є особливо складним у сценаріях керування та моніторингу в режимі реального часу.

Іншим важливим обмеженням є масштабованість та інтерпретованість аналітики, заснованої на даних. Моделі машинного навчання та штучного інтелекту потребують великих обсягів високоякісних даних для навчання й валідації, які можуть бути недоступними для нововстановлених турбін або рідкісних режимів відмов. Крім того, суто дата-орієнтовані моделі не

завжди здатні узагальнювати результати для різних конструкцій турбін, умов експлуатації або вітрових режимів. Це обмеження підкреслює необхідність фізично інформованих і гібридних підходів до моделювання, які явно враховують аеродинамічні навантаження, структурну динаміку та теплову поведінку в аналітичних фреймворках.

Економічні чинники також істотно впливають на впровадження IoT-технологій у вітроенергетичних системах. Розгортання розвиненої сенсорної інфраструктури, розподілених обчислювальних платформ і захищених комунікаційних мереж потребує значних початкових інвестицій. Хоча довгострокові вигоди – зокрема скорочення простоїв, підвищення коефіцієнта готовності та оптимізація технічного обслуговування – можуть компенсувати ці витрати, фактична окупність інвестицій залежить від масштабу турбін, тривалості проєкту та регуляторних умов. Невеликі вітрові електростанції можуть стикатися з додатковими бар'єрами через обмежені фінансові й технічні ресурси.

Нарешті, організаційні та регуляторні виклики впливають на інтеграцію вітрових електростанцій, оснащених IoT-технологіями, у ширші енергетичні системи. Інтероперабельність між SCADA-системами, IoT-платформами та інфраструктурами керування електромережею залишається обмеженою через використання пропрієтарних рішень і відсутність уніфікованих стандартів. Крім того, регуляторні рамки, що визначають питання володіння даними, кібербезпеки та торгівлі електроенергією, істотно відрізняються між регіонами, що ускладнює транскордонну інтеграцію та координацію у великому масштабі.

Підсумовуючи, попри те що IoT-технології відкривають значні можливості для підвищення ефективності, надійності та інтелектуальності систем вітроенергетики, їх результативне впровадження потребує зваженого врахування технічних обмежень, поведінки фізичних систем, ризиків кібербезпеки та економічної доцільності. Подолання зазначених викликів вимагає міждисциплінарних підходів, які поєднують експертизу в галузях інформаційних технологій, вітроенергетичного інжинірингу та експлуатації електроенергетичних систем, а також подальших досліджень у напрямі масштабованих, безпечних і фізично обґрунтованих IoT-архітектур.

Висновки. У цьому дослідженні розглянуто роль Інтернету речей у сучасних системах вітроенергетики та запропоновано уніфіковану чотирирівневу IoT-архітектуру, яка поєднує інформаційні технології з інженерними вимогами вітроенергетики. Запропонована архітектура систематизує функціональні можливості IoT за рівнями моніторингу й керування в режимі реального часу, адаптивного та предиктивного керування, системної оптимізації та стратегічної інтелектуальності, формуючи цілісну основу для аналізу як експлуатаційних, так і довгострокових аспектів цифровізації вітрових електростанцій.

З позицій енергетичного інжинірингу представлений підхід демонструє, яким чином безперервне вимірювання параметрів, удосконалені стратегії керування та оптимізація на основі даних підвищують продуктивність вітрових турбін, покращують їхню надійність і подовжують термін служби обладнання в умовах значної мінливості навколишнього середовища. IoT-орієнтований моніторинг механічних, теплових та аеродинамічних параметрів забезпечує точніше керування роботою турбін, зменшує механічні навантаження та уможливорює впровадження проактивних стратегій технічного обслуговування, які безпосередньо впливають на енергетичний вихід і коефіцієнт готовності системи.

З позицій інформаційних технологій у статті підкреслено важливість парадигм розподілених обчислень, хмарної аналітики, штучного інтелекту та цифрових двійників як ключових чинників формування інтелектуальних систем вітроенергетики. Технології edge- та fog-обчислень зменшують затримки та комунікаційні накладні витрати, тоді як централізовані платформи даних і аналітика на основі штучного інтелекту забезпечують масштабне розпізнавання закономірностей, предиктивне технічне обслуговування та оптимізацію на рівні парку

турбін. Технології цифрових двійників додатково поєднують фізичний і віртуальний домени, уможливаючи безпечне експериментування, прогнозування відмов і підтримку ухвалення рішень, орієнтованих на життєвий цикл.

Аналіз промислових реалізацій підтверджує, що запропонована чотирирівнева архітектура є не лише концептуальною, а й практично здійсненою. Платформи, розгорнуті провідними виробниками вітроенергетичного обладнання та постачальниками сервісних послуг, демонструють, як IoT-технології вже сьогодні застосовуються для підвищення експлуатаційної ефективності, вдосконалення планування технічного обслуговування та покращення взаємодії з електромережею у великому масштабі. Ці приклади з реальної практики підтверджують ефективність поєднання SCADA-систем, розподілених обчислень, аналітики на основі штучного інтелекту та стратегічної інтеграції з електромережею в межах уніфікованої архітектурної концепції.

Попри зазначені переваги, низка проблем залишається актуальною. Ризики кібербезпеки, високі початкові інвестиційні витрати, проблеми якості даних, деградація сенсорів у складних умовах експлуатації, а також потреба в міждисциплінарній експертизі й надалі обмежують повномасштабне використання IoT у системах вітроенергетики. Подолання цих викликів потребує подальших досліджень у сфері захищених архітектур, стандартизованих моделей даних, надійних сенсорних технологій та інтелектуального керування ресурсами в межах розподілених обчислювальних рівнів.

Отже, інтеграція IoT-технологій у вітроенергетичні системи є критично важливим кроком на шляху до створення інтелектуальних, стійких і сталих енергетичних інфраструктур. Чітко поєднуючи інформаційні технології з фізичними енергетичними системами за допомогою структурованої чотирирівневої архітектури, дана робота сприяє глибшому розумінню того, як цифровізація може підтримувати ефективну експлуатацію, довгострокову надійність і стратегічну інтеграцію вітроенергетики в сучасні електроенергетичні мережі. Подальші дослідження доцільно зосередити на вдосконаленні міжрівневих методів оптимізації, посиленні механізмів кібербезпеки та розширенні застосування цифрових двійників і систем підтримки прийняття рішень на основі штучного інтелекту з метою подальшого зміцнення ролі вітроенергетики в глобальному енергетичному переході.

Список використаних джерел

1. WWEA Annual Report 2024 A Challenging Year for Windpower, 2025. URL: <https://www.wwindea.org/>
2. Tawab A. A. Wind Turbine Components Part 8: Sensors and Control System | ECAICO. URL: <https://www.ecaico.com/2025/10/%20wind-turbine-part8-sensors-control-system.html>
3. Rückert F. U. *et al.* Fluid flow and heat transfer of a novel passive cooling system for gearless wind turbines with a power range of 3–12 MW. *Energy*. 2024. Vol. 312. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133478
4. Benhanifia A., Ben Cheikh Z., Oliveira P. M., Valente A., Lima J. Systematic review of predictive maintenance practices in the manufacturing sector. *Elsevier B.V.* 2025. DOI: 10.1016/j.iswa.2025.200501
5. Emexidis C., Gkonis P. The Integration of Internet of Things and Machine Learning for Energy Prediction of Wind Turbines. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(22). DOI: 10.3390/app142210276
6. Wang L., Fan W., Jiang G., Xie P. An efficient federated transfer learning framework for collaborative monitoring of wind turbines in IoE-enabled wind farms. *Energy*. 2023. Vol. 284. P. 128518. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2023.128518
7. Ullo S. L., Sinha G. R. Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors. *Sensors*. 2020. Vol. 20(11). P. 3113. DOI: 10.3390/s20113113
8. Akbarzadeh S., Allahverdi A. Machine Learning Approaches for Wind Turbine Predictive Maintenance: An Interoperational SCADA Data Analysis. URL: https://www.researchgate.net/publication/395239093_Machine_Learning_Approaches_for_Wind_Turbine_Predictive_Maintenance_An_Interoperational_SCADA_Data_Analysis
9. Leon-Medina J. X., Tibaduiza D. A., Parés N., Pozo F. Digital twin technology in wind turbine components: A review. *Intelligent Systems with Applications*. 2025. Vol. 26. P. 200535. DOI: 10.1016/J.ISWA.2025.200535

10. Clifton A. *et al.* Grand challenges in the digitalisation of wind energy. *Wind Energy Science*. 2023. Vol. 8(6). P. 947–974. DOI: 10.5194/wes-8-947-2023
11. Abdullahi I., Perinpanayagam S., Hamidu I. A Fog Computing Based Approach Towards Improving Asset Management and Performance of Wind Turbine Plants Using Digital Twins. *27th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, IEEE. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICAC55051.2022.9911170
12. Ali H. S., Sridevi R. Mobility and Security Aware Real-Time Task Scheduling in Fog-Cloud Computing for IoT Devices: A Fuzzy-Logic Approach. *Comput. J.* 2024. Vol. 67(2). P. 782–805. DOI: 10.1093/comjnl/bxad019
13. Renström N., Bangalore P., Highcock E. System-wide anomaly detection in wind turbines using deep autoencoders. *Renew. Energy*. 2020. Vol. 157. P. 647–659. DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.148
14. Jonas S., Meyer A. Fault detection in new wind turbines with limited data by generative transfer learning. *Energy and AI*. 2025. Vol. 22. P. 100626. DOI: 10.1016/j.egyai.2025.100626
15. Azari A., Miao G., Stefanovic C., Popovski P. Latency-Energy Tradeoff based on Channel Scheduling and Repetitions in NB-IoT Systems. *IEEE Global Communications Conference*. IEEE. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8648024>. DOI: 10.1109/GLOCOM.2018.8648024

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



S. Syrotyuk¹, O. Skliar², V. Ptashnyk¹, V. Klymchuk¹, G. Walowski³

¹ Lviv National Stepan Gzhytsky University of Veterinary Medicine and Biotechnology

² Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

³ Institute of Technology and Life Sciences – National Research Institute

FOUR-LEVEL INTERNET OF THINGS ARCHITECTURE FOR WIND ENERGY SYSTEMS: MONITORING, OPTIMIZATION, AND GRID INTEGRATION

Summary

The article examines the role of the Internet of Things (IoT) in modern wind energy systems and substantiates the feasibility of integrating IoT technologies with wind power generation. A unified four-level architecture for IoT-oriented wind energy systems is proposed, structured according to the increasing complexity of control, decision-making time horizons, and the scale of integration with the physical power system. The first level covers real-time monitoring and control based on sensor data. The second level involves adaptive and predictive control supported by machine learning for failure prediction and condition-based maintenance. The third level focuses on wind-farm-level optimization through digital twins, cloud analytics, and coordinated maintenance planning. The fourth level addresses lifecycle-oriented management, cyber-physical security, grid interaction, and environmental analytics. The article also reviews industrial implementations of IoT in wind energy, including monitoring and diagnostic platforms and AI-based decision support tools. Particular attention is paid to SCADA integration, digital twins, and secure data exchange mechanisms. The main technical, organizational, and economic challenges of large-scale IoT deployment are outlined, including sensor reliability, communication constraints, cybersecurity risks, data quality, and scalability of intelligent analytics. It is concluded that IoT technologies are a key enabler for improving the efficiency, reliability, and long-term sustainability of wind energy infrastructure.

Keywords: IoT, renewable energy, turbine, wind farms, AI, offshore.