

Масштабований веб-інструмент для оцінки потенціалу вітрової та сонячної енергії й прогнозування генерації

Владислав Вернета, аспірант, Артур Запорожець, д.т.н., ст. дослідник, заступник директора

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України, Київ, Україна,

Анотація

Енергетичний сектор України переживає швидку трансформацію через необхідність відновлення генерувальних потужностей після масштабних руйнувань інфраструктури та прискореної інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Це підвищує вимоги до точності прогнозування виробництва електроенергії, аналізу потенціалу та ризиків, а також до зручних, масштабованих інструментів підтримки прийняття рішень. У роботі представлено **GreenPowerAtlas** — сучасну веб-платформу для оцінки потенціалу сонячної й вітрової енергії та коротко- і середньострокового прогнозування генерації. Платформа поєднує історичні супутникові дані (NASA POWER), чисельні метеопрогнози (Open-Meteo) і локальні станції, підтримує геоінформаційні візуалізації, експрес-аналітику й експорт даних. Для прогнозування використано ARIMA, LSTM та гібридні підходи, а для вітрової енергетики — стохастичні моделі на основі розподілу Вейбулла. Наведено архітектуру, приклади впровадження (зокрема, техніко-економічне обґрунтування в Західній Україні) та отримані покращення точності/корисності. GreenPowerAtlas готовий до масштабування та практичного використання в плануванні, диспетчеризації й балансуванні системи.

Ключові слова

прогнозування енерговиробництва, відновлювані джерела енергії, фотоелектрична генерація, вітрова енергетика, NASA POWER, Open-Meteo, ARIMA, LSTM, стохастичне моделювання вітру, NWP-прогнози, розосереджена генерація, енергетична аналітика.

1. Вступ

За останні роки Україна втратила значну частину своїх генеруючих потужностей: за даними галузевих експертів, понад 42% потужностей з виробництва електроенергії було зруйновано або зайнято, включаючи майже 87% вугільних теплових електростанцій. Також пошкоджено або втрачено активи відновлюваної генерації — понад 3,9 ГВт сонячних та вітрових електростанцій не працюють. Такі втрати серйозно підірвали енергетичну безпеку країни та посилили залежність від імпорту електроенергії з ЄС, що не може повністю компенсувати дефіцит потужностей у періоди пікового споживання [1].

На цьому тлі розвиток розподіленої генерації на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) набуває особливого значення. Тільки у 2024 році в Україні було введено в експлуатацію понад 944 МВт нових потужностей розподіленої генерації — переважно сонячної, хоча лише частина цієї потужності була повністю підключена до мережі. Довгострокові прогнози показують, що до 2030 року встановлена потужність відновлюваної генерації може досягти 9,2 ГВт, що становитиме близько 12–15% національного енергетичного балансу. Поряд із розвитком технологій зберігання енергії та гнучких газодвигунних установок, це створить основу для відновлення стабільності та балансу системи. Однак зростання частки ВДЕ створює серйозні проблеми, пов'язані, перш за все, з мінливістю виробництва та необхідністю точного прогнозування виробництва електроенергії [1].

Існуючі міжнародні інструменти для оцінки та прогнозування потенціалу ВДЕ, такі як PVGIS (Фотоелектрична географічна інформаційна система), Meteonorm та RETScreen, відіграють певну роль у попередньому плануванні, але мають обмеження для застосування в Україні. Вони часто не мають достатньої просторової роздільної здатності, не інтегрують прогнози погоди в режимі реального часу та в основному зосереджені на техніко-економічній оцінці, а не на точному коротко- та середньостроковому прогнозуванні. Глобальні кліматичні бази даних, такі як NASA POWER, надають довгострокові набори супутникових даних, але їм бракує локальної адаптації та інтеграції з поточними прогнозами. Це створює розрив між потребами українського енергетичного сектору та доступними аналітичними інструментами [2-4].

Для вирішення цих проблем Інститут загальної енергетики НАН України розробив GreenPowerAtlas — сучасну веб-платформу для аналізу та прогнозування виробництва сонячної та вітрової енергії. Система інтегрує довгострокові супутникові дані NASA POWER з короткостроковими прогнозами Open Meteo, підтримує інтерактивну візуалізацію та аналітику, а також реалізує передові алгоритми прогнозування, починаючи від класичних статистичних моделей (ARIMA) і закінчуючи глибокими нейронними мережами (LSTM). Її метою є допомога інвесторам, інженерам та енергетичним операторам у плануванні та балансуванні розподіленої генерації під час енергетичного відновлення України [5].

2. Огляд існуючих рішень та наукових підходів

Точне прогнозування виробництва електроенергії з відновлюваних джерел має вирішальне значення для підтримки стабільності мережі та інтеграції нових сонячних та вітрових установок. Протягом останніх десятиліть

було розроблено численні інструменти та методи, але більшість із них стикаються з обмеженнями, що перешкоджають їх використанню в українських умовах (Таблиця 1) [5-7]. Серед найпоширеніших міжнародних платформ для оцінки ВДЕ є PVGIS, Meteonorm та RETScreen Expert. PVGIS надає довгострокові кліматичні ряди та оцінки потенційної генерації для заданих місць, але його дані мають недостатню просторову роздільну здатність для України та не мають інтеграції короткострокового прогнозу погоди. Meteonorm, комерційний продукт, генерує кліматичні ряди для будь-якого місця, але зосереджується переважно на довгострокових середніх значеннях та не має інтеграції метеорологічного API в режимі реального часу. RETScreen Expert широко використовується для техніко-економічної оцінки енергетичних та ефективних проєктів, пропонуючи потужні функції інвестиційного аналізу, але обмежені можливості короткострокового прогнозування.

Сервіс NASA POWER надає безкоштовний доступ до довгострокових супутникових кліматичних наборів даних, включаючи сонячну радіацію, швидкість та напрямок вітру, температуру та вологість, але не має локальної адаптації для України та не включає короткострокові прогнози, необхідні для оперативного управління. І навпаки, Open Meteo пропонує погодинні прогнози з високою роздільною здатністю та легким доступом до API, але не має глибоких історичних даних, необхідних для стратегічного планування [7-9].

Нещодавні дослідження (2020–2024) демонструють зростаючий інтерес до гібридних підходів, що поєднують статистичні моделі та моделі машинного навчання для прогнозування відновлюваної енергетики. Класичні методи, такі як AR, ARMA та ARIMA, залишаються популярними завдяки своїй простоті, але мають обмежену точність за швидкозмінних погодних умов. Підходи машинного навчання (SVR, Random Forest, XGBoost) та рекурентні нейронні мережі, такі як LSTM, демонструють підвищену точність для нелінійної часової динаміки. Гібридні моделі, такі як ARIMA-LSTM, ефективно фіксують як сезонні, так і короткострокові коливання.

Для оцінки вітрового потенціалу стандартом залишаються стохастичні моделі розподілу швидкості вітру, зокрема Вейбулла, Гамма та логнормальна. Поєднання їх із супутниковими даними (наприклад, NASA POWER) підвищує точність, хоча локальне калібрування залишається необхідним. Все частіше розробляються інтегровані системи, які об'єднують довгострокову статистику з даними прогнозу в режимі реального часу [10-12].

Підсумовуючи, більшість інструментів вирішують окремі завдання: довгострокове планування, короткострокове прогнозування або техніко-економічний аналіз. Українська енергетика потребує інтегрованої системи, що поєднує багаторічні супутникові дані, поточні прогнози погоди, масштабовану архітектуру та інтуїтивно зрозумілу візуалізацію — саме цю нішу прагне заповнити GreenPowerAtlas [4, 9].

Table 1. Comparison of key international solutions for forecasting energy production from renewable energy sources (RES)

System	Data sources	Temporal resolution	Short-term forecasting capability	Wind energy support	Visualization & interactivity	Local adaptation for Ukraine
PVGIS	Satellite climate series (JRC/EC)	Daily / monthly	No	Limited (primarily solar)	Online maps and charts	Low (general European data)
Meteonorm	Global database of climate stations	Monthly	No	Partial	Graphical interface	No adaptation
RETScreen Expert	NASA, climate archives	Daily	No	Yes	Analytical dashboards	Limited
NASA POWER	Satellite climate data	Daily / monthly	No	Yes	API without interactive interface	Low
Open Meteo	NWP forecast models	Hourly	Yes	Yes	API	None
GreenPowerAtlas	NASA POWER + Open Meteo + local stations	Hourly and multi-year	Yes (ARIMA, LSTM)	Yes	Interactive map, charts, export	High (adapted to regions of Ukraine)

3.Архітектура та реалізація програмного забезпечення

Програмно-інформаційний комплекс GreenPowerAtlas був задуманий як сучасна веб-платформа з модульною та масштабованою архітектурою, розроблена для ефективної обробки та аналізу величезних обсягів метеорологічних та енергетичних даних. Фундаментальна філософія проєктування полягала в об'єднанні гнучкої клієнт-серверної архітектури з високопродуктивними системами зберігання даних та передовими інструментами візуалізації, що забезпечує користувачам інтуїтивно зрозумілий доступ до складної аналітики без шкоди для

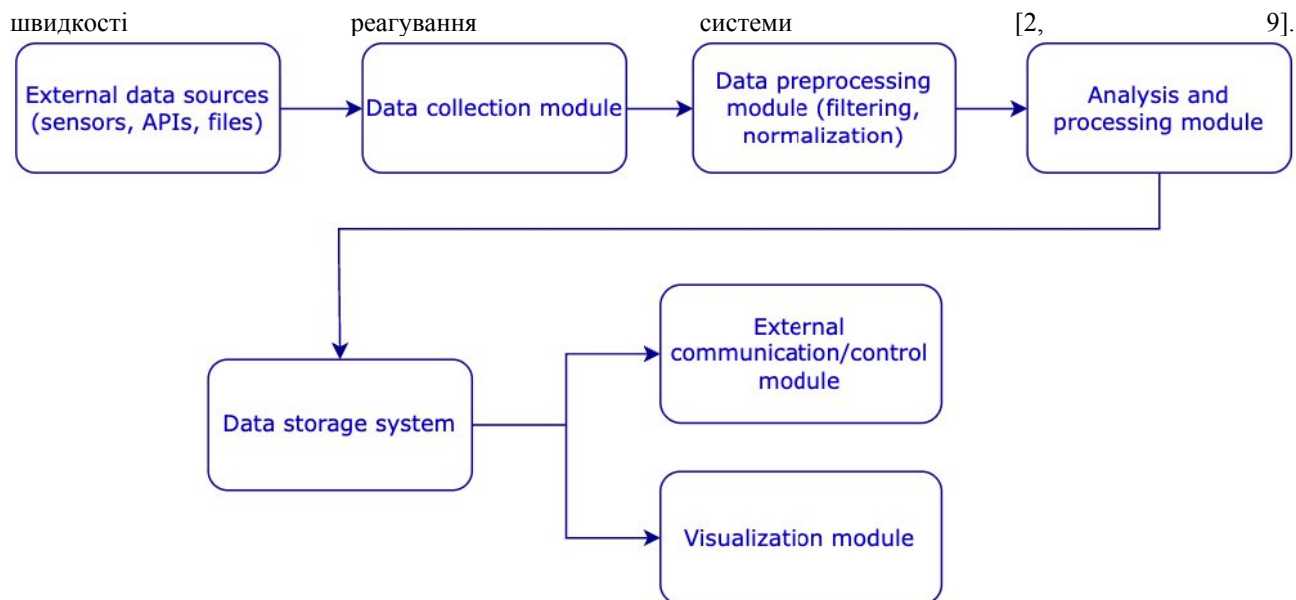


Fig. 1. Архитектура програмного пакету GreenPowerAtlas

Структурно платформа організована у три основні рівні: інтерфейс користувача (фронтенд), сервер додатків (бекенд) та підсистема зберігання та обробки даних (рис. 1). Такий поділ забезпечує масштабованість та стійкість до високих обчислювальних навантажень, що є критично важливим при роботі з багатодесятирічними погодинними наборами даних та одночасному доступі багатьох користувачів.

На рівні інтерфейсу користувача система використовує фреймворк Vue.js, що пропонує інтерактивну роботу з картографічними шарами, аналітичними віджетами та динамічною графікою. Інтерфейс дозволяє користувачам вибирати географічні регіони, визначати часові діапазони та візуалізувати дані за допомогою інтерактивних карт, графіків часових рядів, коробкових діаграм та гістограм. Завдяки адаптивному дизайну платформа забезпечує однакову зручність використання як на настільних комп'ютерах, так і на мобільних пристроях. Крім того, функції експорту даних у формати CSV, Excel та PDF полегшують подальший аналіз та інтеграцію з іншими аналітичними системами.

Бекенд реалізовано за допомогою Laravel (PHP) з архітектурою REST API, що дозволяє швидко масштабувати та безперешкодно інтегрувати зовнішні сервіси. Важкі запити користувачів обробляються асинхронно, мінімізуючи затримку під час взаємодії з великими наборами даних. Механізми кешування на основі Redis значно прискорюють продуктивність системи, зменшуючи надлишкові обчислення для повторюваних запитів.

Рівень зберігання даних поєднує дві системи керування базами даних — PostgreSQL та ClickHouse. PostgreSQL зберігає конфігурації користувачів, аналітичні результати та допоміжні метадані, тоді як ClickHouse оптимізовано для обробки масивних погодинних наборів кліматичних даних. Його стовпцево-орієнтоване зберігання та оптимізація аналітичних запитів забезпечують виняткову продуктивність та дозволяють майже миттєвий доступ до історичних метеорологічних записів. Ця гібридна архітектура успішно поєднує транзакційну гнучкість зі швидкістю аналізу.

Безпека даних є окремим пріоритетом проектування. Платформа використовує шифрування HTTPS з алгоритмом AES-256, двофакторну автентифікацію та захист від атак SQL-ін'єкцій. Контроль доступу на основі ролей дозволяє системі обробляти конфіденційні дослідницькі та корпоративні набори даних з точністю та конфіденційністю.

Архітектурно GreenPowerAtlas підтримує горизонтальне масштабування: додаткові сервери можна розгорнути для балансування навантаження та розширення сховища даних без суттєвих змін у вихідному коді. Ця можливість є важливою в контексті постійно зростаючих наборів кліматичних та прогнозних даних і розширення бази користувачів. Крім того, система дотримується принципів аналітики великих даних і розроблена для майбутньої інтеграції з платформами машинного навчання, що дозволить автоматизоване оновлення прогнозів.

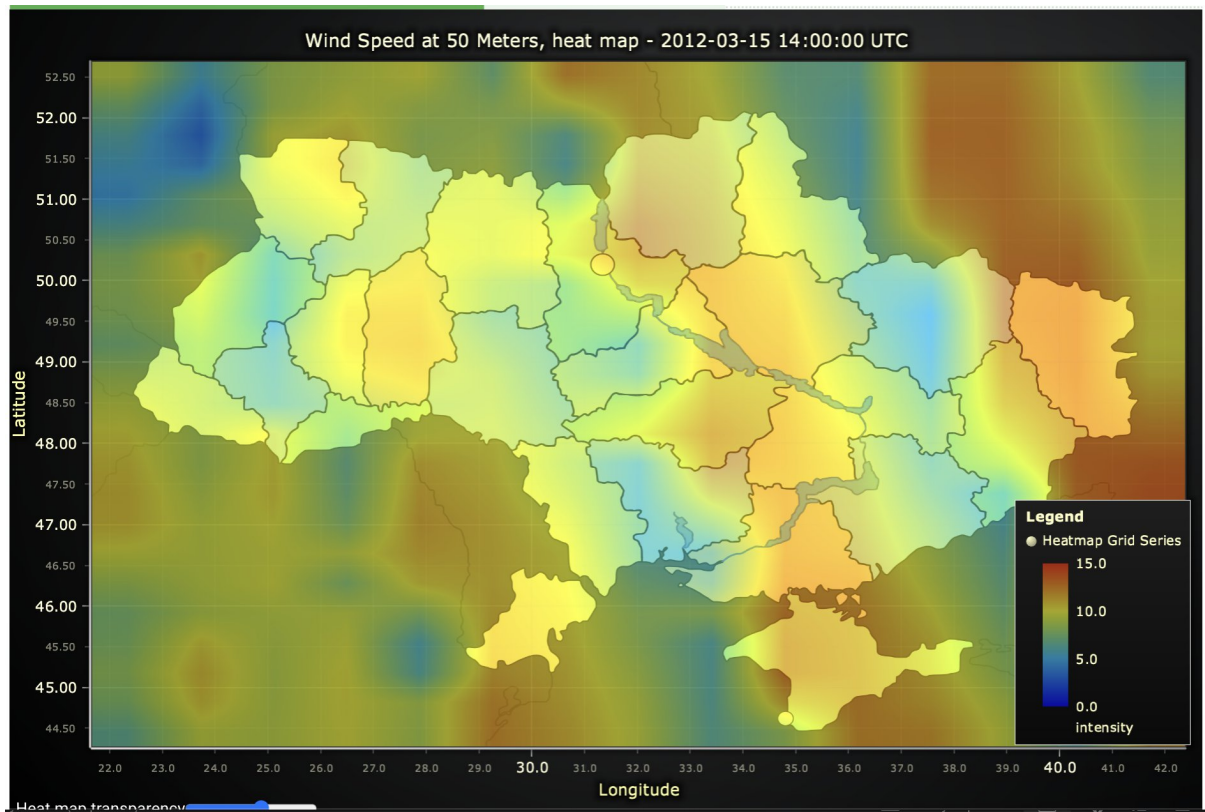


Fig. 2. Інтерфейс веб-застосунку: інтерактивна карта та динамічні діаграми

Зрештою, інтерфейс платформи надає широкі можливості картографічної візуалізації. Користувачі можуть досліджувати карти середньорічної швидкості вітру, сонячної радіації, температури та інших кліматичних параметрів, накладати аналітичні шари та інтерактивно порівнювати сценарії (рис. 2). Динамічні діаграми дозволяють оцінювати часові зміни, аналізувати сезонну динаміку та експортувати отримані набори даних для моделювання енергетичних систем.

4. Математичні та алгоритмічні методи прогнозування

Прогнозування виробництва відновлюваної енергії вимагає інтеграції історичних кліматичних рядів, адаптивних прогнозних даних та моделей, що враховують як сезонні, так і короткострокові коливання. GreenPowerAtlas реалізує багаторівневий підхід, що поєднує статистичні методи та методи машинного навчання.

Попередня обробка даних забезпечує якість та узгодженість даних. Набори даних NASA POWER та Open Meteo проходять нормалізацію, обробку пропущених значень, виявлення аномалій та інтерполяцію для вирівнювання часової роздільної здатності (наприклад, перетворення щоденних даних NASA на погодинні за допомогою корекцій Open Meteo) [11, 13-15].

Для короткострокового прогнозування (годинного/добового) використовується модель ARIMA:

$$y_t = c + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t,$$

де p – порядок авторегресії, q – порядок ковзного середнього, а ε_t представляє білий шум. Хоча ARIMA фіксує сезонні закономірності, її точність знижується за швидкозмінних погодних умов.

Для моделювання складних, нелінійних часових залежностей застосовуються нейронні мережі LSTM. Мережі LSTM зберігають довгострокові залежності через вентиля пам'яті (вхід, вихід, забуття), пом'якшуючи проблеми з градієнтом зникнення, типові для рекурентних мереж. Вони особливо ефективні для прогнозування генерації вітру, де відбуваються раптові зміни вітру.

Стохастичне моделювання потенціалу вітру

Розподіл швидкості вітру моделюється за допомогою функцій щільності ймовірності, найчастіше розподілу Вейбулла:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-(v/c)^k},$$

де v – швидкість вітру, k – параметр форми (турбулентність), а c – параметр масштабу (середня швидкість вітру). Це допомагає оцінити коефіцієнт потужності та оптимізувати висоту турбіни.

Точність моделі оцінюється за допомогою таких показників, як MAPE, RMSE та коефіцієнт детермінації (R^2). Поєднання ARIMA з LSTM покращує точність короткострокового прогнозу порівняно з окремими методами [16-17, 19].

Year 2006	Longitude 29.901
Meteo parameter WS50M	Latitude 47.959

LOAD

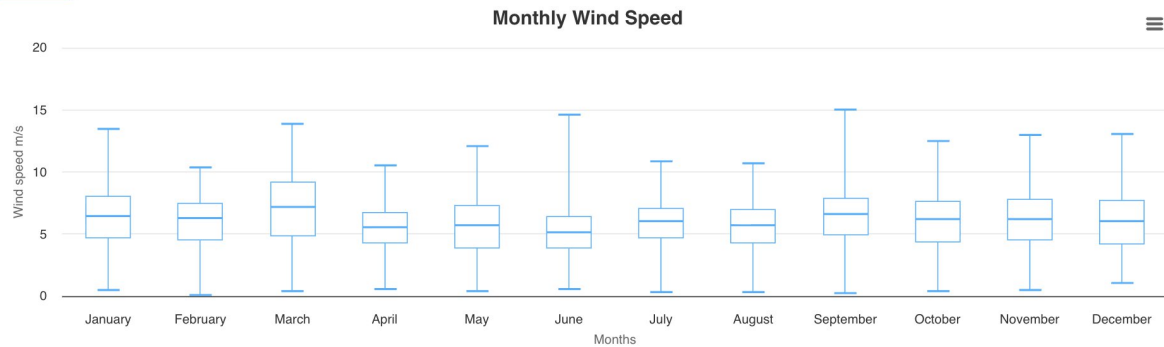


Fig. 3. Розподіл швидкості вітру за місяцями на висоті 50 м за 2006 рік у координатах 47.959° пн.ш., 29.901° сх.д. На діаграмі показано медіану, міжквартильний діапазон та мінімальні/максимальні спостереження для кожного місяця.

Для представлення статистичного розкиду та виявлення викидів у даних було використано діаграму «коробка та вуса» (або просто коробкову діаграму) (рис. 3). Цей метод візуалізації особливо ефективний в енергетичній аналітиці, оскільки він лаконічно відображає мінливість та асиметрію швидкості вітру, сонячної радіації або інших метеорологічних змінних протягом часових інтервалів. На відміну від простого аналізу середнього значення та стандартного відхилення, коробкова діаграма виділяє медіани, квартилі та викиди, забезпечуючи глибше розуміння форми розподілу та стабільності даних [18-19].

Нехай $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ буде впорядкованим набором даних.

Медіана (Q_2) ділить набір даних на дві рівні половини:

$$Q_2 = \begin{cases} \frac{x_{n+1}}{2}, & \text{if } n \text{ is odd} \\ \frac{x_n + x_{n+1}}{2}, & \text{if } n \text{ is even} \end{cases}.$$

Перший (Q_1) та третій квартилі (Q_3) представляють 25-й та 75-й проценти відповідно, позначаючи межі центральних 50% значень: $Q_1 = x_{(n+1) \cdot 0.25}$, $Q_3 = x_{(n+1) \cdot 0.75}$.

Міжквартильний діапазон (IQR) виражає розкид середньої половини набору даних: $IQR = Q_3 - Q_1$.

Вуса поширюються до найекстремальніших значень у межах 1,5 IQR від квартилів, визначаючи діапазон, що не є викидами:

$$L = Q_1 - 1.5 \times IQR, U = Q_3 + 1.5 \times IQR.$$

Значення поза межами $[L, U]$ вважаються викидами, які часто зображуються як окремі точки. Ці викиди є вирішальними в аналізі відновлюваної енергетики, оскільки вони можуть відповідати екстремальним метеорологічним умовам, таким як раптові пориви вітру або піки високої опроміненості, які можуть суттєво вплинути на прогнози виробництва [20-22].

Загалом, коробкові діаграми забезпечують інтуїтивний спосіб порівняння розподілу даних між періодами часу, місцями розташування або наборами даних. У GreenPowerAtlas цей метод покращує візуальну інтерпретацію мінливості вітру та сонця, допомагаючи аналітикам швидко оцінити надійність даних та виявляти аномалії перед застосуванням моделей прогнозування.

5. Застосування та результати

Платформа GreenPowerAtlas пройшла ретельну валідацію з використанням реальних наборів даних, що доводить її універсальність та ефективність у численних сферах застосування відновлюваної енергетики в Україні. Процес валідації поєднав багаторічні кліматичні ряди з короткостроковими метеорологічними прогнозами, забезпечуючи комплексну оцінку точності моделі, якості інтеграції та обчислювальної продуктивності. Понад два десятиліття даних про швидкість вітру NASA POWER та прогнозів Open Meteo були оброблені для створення детальних карт вітрового потенціалу. Застосовуючи розподіли ймовірності Вейбулла та Гамма, система розраховувала середні швидкості вітру та коефіцієнти потужності на різних висотах вузлів турбіни. Ці результати дозволили створити інтерактивні карти, що відображають як річні, так і сезонні коливання, що допомагає визначити регіони з найвищим потенціалом вітрової енергії та оптимізувати конфігурацію вітрових електростанцій для максимальної ефективності.

У галузі сонячної енергетики GreenPowerAtlas генерує карти сонячної радіації високої роздільної здатності, які визначають найперспективніші напрямки для розвитку фотоелектричної енергетики. Порівняльний аналіз виявив

значні розбіжності між офіційно опублікованими кліматичними нормами та сучасними супутниковими спостереженнями, що підкреслює здатність системи надавати більш точні та регіонально-специфічні оцінки. Такі уточнені дані виявляються безцінними для інвесторів, розробників проектів та інженерів, які прагнуть мінімізувати невизначеність в оцінках виробництва та покращити фінансову життєздатність сонячних проектів. Технологічна основа платформи забезпечує виняткову продуктивність. Інтеграція бази даних ClickHouse дозволяє майже миттєво запитувати десятки мільйонів погодинних метеорологічних записів, а інтерактивні регіональні карти генеруються менш ніж за 200 мілісекунд. Така швидкість реагування демонструє готовність платформи не лише до академічного та дослідницького використання, але й до безперервної роботи в промисловому та урядовому контексті. Крім того, GreenPowerAtlas підтримує зовнішні набори даних та локальні метеорологічні датчики, розширюючи свої можливості для індивідуального прогнозування та високоточного аналізу.

Яскравим прикладом застосування платформи є техніко-економічне обґрунтування індустріального парку Новий Розділ, де GreenPowerAtlas використовувався для визначення оптимального розміщення вітрових турбін та конфігурацій висоти ступиці. Використовуючи понад двадцять років даних про вітер, уточнених за допомогою поточних метеорологічних прогнозів, система надала точні оцінки коефіцієнта потужності та визначила найефективніші сценарії проектування. Така методологічна інтеграція довгострокової статистики та короткострокових прогнозів значно знижує інвестиційні ризики, поєднуючи просторову візуалізацію з аналітичним моделюванням, забезпечуючи обґрунтоване прийняття рішень на ранніх стадіях розвитку відновлюваної енергетики.

Окрім технічного моделювання, платформа відіграє вирішальну роль у підвищенні стабільності та балансування мережі, надаючи прогнози виробництва з високою роздільною здатністю, які допомагають операторам розподілених енергетичних систем. Вона підтримує інтеграцію із системами SCADA та диспетчерського управління, надаючи надійні аналітичні дані для роботи в режимі реального часу. Крім того, GreenPowerAtlas слугує цінним освітнім та дослідницьким середовищем, пропонуючи можливості для експериментів з великими наборами кліматичних даних, розробки інноваційних алгоритмів прогнозування та моделювання сценаріїв розподіленої генерації.

Платформа втілює в собі як науково-дослідний інструмент, так і практичне інженерне рішення, що усуває розрив між теоретичним аналізом та практичним застосуванням. Поєднуючи аналітику великих даних, візуалізацію та масштабовані обчислення, вона сприяє переходу України до незалежності від відновлюваної енергетики та технологічної стійкості.

6. Висновки

Розроблена платформа GreenPowerAtlas вирішує критично важливу проблему для енергетичного сектору України — точне та гнучке прогнозування виробництва електроенергії з відновлюваних джерел. Завдяки інтеграції довгострокових супутникових даних NASA POWER з короткостроковими прогнозами Open Meteo та використанню передових алгоритмів (ARIMA, LSTM, стохастичних моделей), вона забезпечує потужний аналітичний інструмент для кількох часових горизонтів.

Практичні застосування, такі як оцінка індустріального парку Новий Розділ, продемонстрували зручність використання в реальних умовах. Платформа знижує інвестиційні ризики, покращує стабільність мережі та покращує прийняття рішень щодо розвитку відновлюваної енергетики.

Подальша робота буде зосереджена на глибшій інтеграції алгоритмів машинного навчання, локальних сенсорних мереж та аналітики викидів парникових газів для оцінки вуглецевого сліду проектів відновлюваної енергетики. Таким чином, GreenPowerAtlas являє собою як науково обґрунтований, так і комерційно життєздатний продукт, який зміцнює потенціал відновлюваної енергетики та енергетичну незалежність України.

Подяка

Ця робота була підтримана проектом «Дослідження роботи об'єктів розподіленої генерації з системами накопичення енергії на основі метеорологічних даних» (0124U002308, 2024-2025), який фінансується Національною академією наук України.

Конфлікт інтересів

Автори стверджують, що немає жодних фінансових чи інших потенційних конфліктів щодо цієї роботи.

Посилання

1. What will Ukraine's electricity mix look like: a forecast to 2030. [Online]. Available: https://enerhodzherela.com.ua/analitika/Yakym_bude_ukrayinsky_elektroenerhetychnyy_miks.
2. Zaporozhets, A.O. (2021). Correlation analysis between the components of energy balance and pollutant emissions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05048-9>
3. Komar, V.O., & Semenyuk, Yu.V. (2022, May 31–June 1). Analysis of existing models for forecasting solar insolation, comparing forecasted values with actual insolation values for specific days. *LI Scientific and Technical Conference of the Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics*. Vinnytsia National Technical University. Retrieved August 5, 2024 [Online]. Available: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/40275/15939.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
4. Rodrigues, G. C., & Braga, R. P. (2021). Evaluation of NASA POWER reanalysis products to estimate daily weather variables in a hot summer Mediterranean climate. *Agronomy*, 11(6), 1207.
5. Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C. A., Darmenov, A., Bosilovich, M. G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., da Silva, A. M., Gu, W., Kim, G.-K. ... Zhao, B. (2017). The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30(14), 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
6. MacLachlan, C., Arribas, A., Peterson, K. A., Maidens, A., Fereday, D., Scaife, A. A., Gordon, M., Vellinga, M., Williams, A., Comer, R. E., Camp, J., Xavier, P., & Madec, G. (2015). Global Seasonal Forecast System version 5 (GloSea5): A high-resolution seasonal forecast system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(689), 1072–1084. <https://doi.org/10.1002/qj.2396>
7. Shulzhenko, S., Nechaieva, T., & Leshchenko, I. (2024). The application of the optimal unit commitment problem for the studies of the national power sector development under system risks. In A. Zagorodny, V. Bogdanov, A. Zaporozhets (Eds.), *Nexus of Sustainability. Studies in Systems, Decision and Control*, 559 (pp. 147–164). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66764-0_7
8. Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, Ch., Seiki, T., Noda, A. T., Yamada, Y., Goto, D., Sawada, M., Miyoshi, T., Niwa, Y., Hara, M., Ohno, T., Iga, Sh., Arakawa, T., Inoue, T., & Kubokawa, H. (2014). The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: Description and development. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1(18), 1–32. <https://doi.org/10.1186/s40645-014-0018-1>
9. Babak, V.P., Babak, S.V., Eremenko, V.S., Kuts, Yu.V., Myslovych, M.V., Scherbak, L.M., & Zaporozhets, A.O. (2021). Problems and Features of Measurements. Models and Measures in Measurements and Monitoring. *Studies in Systems, Decision and Control*, 360 (pp. 1–31). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5_1
10. Wang K., Qi X., Liu H. Photovoltaic power forecasting based on LSTM-Convolutional Network. *Energy*. 2019. 189: 116225. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116225>.
11. Liu X., Lin Z., Feng Z. Short-term offshore wind speed forecast by seasonal ARIMA — a comparison against GRU and LSTM. *Renewable Energy*. 2021. 164: 598–609. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.119>.
12. van der Meer D.W., Widén J., Munkhammar J. Review on probabilistic forecasting of photovoltaic power production and electricity consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. 81: 1484–1512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.212>.
13. Kumari P., Toshniwal D. Deep learning models for solar irradiance forecasting: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*. 2021. 318: 128566. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128566>.
14. Yang D., Alessandrini S., Antonanzas J. Automatic hourly solar forecasting using machine learning models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. 105: 487–498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.006>.
15. Hong T., Pinson P., Wang Y., Weron R., Yang D., Zareipour H. Energy Forecasting: A Review and Outlook. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*. 2020. 7: 376–388. <https://doi.org/10.1109/OAJPE.2020.3029979>.
16. Marinho F.P., Rocha P.A.C., Sousa R.C., Feitosa E.A.N. Short-Term Solar Irradiance Forecasting Using CNN-1D, LSTM, and CNN-LSTM. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2022. 145(4): 041002. <https://doi.org/10.1115/1.4056122>.
17. Zhang T., Stackhouse P.W., Macpherson B., Mikovitz J.C. POWER Release 8: NASA global meteorology and surface solar energy dataset. *Earth System Science Data*. 2018. 10: 583–593. <https://doi.org/10.5194/essd-10-583-2018>. power.larc.nasa.gov
18. Sparks A.H., Moraga P., Dahinden F. nasapower: A NASA POWER Data Client for R. *Journal of Open Source Software*. 2018. 3(30): 1035. <https://doi.org/10.21105/joss.01035>.
19. Voyant C., Nottou G., Kalogirou S.A. Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review. *Renewable Energy*. 2017. 105: 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.095>.

20. Scolari E., De Falco P., Guala A., Manzoni A., Quarteroni A. Short-term wind power forecasting via long short-term memory networks and in-situ measurements. *Applied Energy*. 2021. 293: 116918. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116918>.
21. Yang D., Perez R., Bosse S., Badescu V., Remund J. Forecasting solar irradiance and photovoltaic power. *Solar Energy*. 2020. 207: 565–612. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.097>.
22. Huertas-Tato J., Grela J., Manso P., Jiménez-Cano A., Sainz R. Short-term PV power forecasting based on numerical weather predictions by LSTM. *Renewable Energy*. 2021. 170: 1036–1048. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.086>

ISSN: 2617-846X (online)

Верпета Владислав Олександрович

Номер ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0001-3572-0388>

Запорожець Артур Олександрович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0704-4116>

Дата отримання статті -19.10.25.

Дата отримання фінального варіанту – 17.11.25.

Дата виходу публікації- 30.12.25.

Data about authors

Верпета Владислав Олександрович,
аспірант,

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України
вул. Антоновича, 172, м. Київ, Україна, 03150

E-mail: Verpeta_VO@nas.gov.ua

Контактний тел.: +38-044 294-67-22

Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 6

Кількість статей у міжнародних базах даних – 0

Номер ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0001-3572-0388>

Vladyslav Verpeta,

PhD student,

General Energy Institute of the NAS of Ukraine

172, Antonovycha St., Kyiv, Ukraine, 03150

E-mail: Verpeta_VO@nas.gov.ua

Contact tel.: +38-044 294-67-22

The number of articles in national databases — 6

The number of articles in international databases — 0

Number ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3572-0388>

Запорожець Артур Олександрович,

Доктор технічних наук, старший дослідник

Заступник директора з наукової роботи та організаційної роботи,

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

вул. Антоновича, 172, м. Київ, Україна, 03150

E-mail: a.o.zaporozhets@nas.gov.ua

Контактний тел.: +38-044 294-67-22

Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 34

Кількість статей у міжнародних базах даних – 194

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0704-4116>

Artur Zaporozhets

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher

Deputy Director for Scientific and Organisational Work

General Energy Institute of the NAS of Ukraine

172, Antonovycha St., Kyiv, Ukraine, 03150

E-mail: a.o.zaporozhets@nas.gov.ua

Contact tel.: +38-044 294-67-22

The number of articles in national databases — 34

The number of articles in international databases — 194

Number ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0704-4116>