

4. Ren X., Mi Z., Georgopoulos P. G. Comparison of Machine Learning and Land Use Regression for fine scale spatiotemporal estimation of ambient air pollution: Modeling ozone concentrations across the contiguous United States. *Environment International*. 2020. Vol. 142. P. 105827. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105827>.

5. Gupta N. S. et al. Prediction of Air Quality Index Using Machine Learning Techniques: A Comparative Analysis. *Journal of Environmental and Public Health*. 2023. Vol. 2023. P. 1–26. <https://doi.org/10.1155/2023/4916267>.

6. Konovalov I. B. et al. Atmos Multi-annual changes of NO_x emissions in megacity regions: nonlinear trend analysis of satellite measurement based estimates. *Chem. Phys.* 2010. Vol. 10, no. 17. P. 8481–8498. <https://doi.org/10.5194/acp-10-8481-2010>.

7. Garcia I., Rodriguez J. G., Tenorio Ye. M. Artificial Neural Network Models for Prediction of Ozone Concentrations in Guadalajara, Mexico. *Air Quality-Models and Applications*. InTech, 2011. <https://doi.org/10.5772/16839>.

УДК 621.317.38-048.34

**ЦИФРОВІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ОЦІНЮВАННЯ РЕСУРСІВ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ
ВІТРУ У ВІННИЦЬКІЙ ОБЛАСТІ**
DIGITALIZATION OF RENEWABLE WIND ENERGY RESOURCE ASSESSMENT PROCESSES IN
THE VINNITSIA REGION

Віталій Василенко

Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, Україна

У статті досліджено енергетичний потенціал вітру на території Вінницької області на основі статистичних даних роботи вітроенергетичних установок Tumo-Int, RX-SV2500, Magnum за 2021-2023 роки. Проведено аналіз середньомісячної та середньорічної потужності, визначено сезонні особливості вітрового режиму регіону, побудовано графіки та таблиці. Також проведено комплексний аналіз вітроенергетичних ресурсів Вінницької області як базису для розбудови автономних енергосистем на підприємствах агропромислового комплексу. На основі метеорологічних даних регіону досліджено розподіл швидкостей вітру та розраховано очікувану річну генерацію для систем малої та середньої потужності. Отримані результати свідчать про наявність стабільного, хоча й помірною, вітрового потенціалу, що підтверджує доцільність використання малих вітроустановок у автономних та гібридних системах електропостачання. Особливу увагу приділено практичному аспекту впровадження вітрогенераторів (на прикладі кластеру турбін малої потужності) для енергозабезпечення тваринницьких ферм. У роботі представлено порівняльний аналіз сучасних систем накопичення енергії (BESS) на базі LiFePO₄ та ЛТО технологій, визначено оптимальні стратегії їх експлуатації в режимі згладжування пікових навантажень. Автори обґрунтовують доцільність створення гібридних енергетичних вузлів, що поєднують вітрову генерацію з біогазовими установками та сонячними електростанціями. Такий підхід дозволяє нівелювати сезонну нестабільність вітру та забезпечити високий рівень енергонезалежності для об'єктів з поголів'ям понад 400 одиниць ВРХ. Сформульовано висновки щодо економічної ефективності та технічних вимог до інтеграції Smart Grid систем у локальні мережі Вінниччини.

Вінниччина має специфічний ландшафт, де вітрова активність часто вища на відкритих плато, що ідеально підходить для фермерських господарств. Акцент статті зроблений на поєднанні вітру саме з біогазом (що природно для цього регіону з розвиненим тваринництвом). В умовах глобальної енергетичної трансформації та зростання екологічних викликів використання відновлюваних джерел енергії набуває особливої актуальності. Вітроенергетика є одним із найбільш перспективних

напрямів альтернативної енергетики завдяки невичерпності ресурсу, екологічній чистоті та можливості локального виробництва електроенергії.

Вінницька область розташована в зоні помірного клімату, для якої характерні відносно стабільні вітрові умови протягом року. Це створює передумови для розвитку малої та середньої вітроенергетики, зокрема для забезпечення електроенергією приватних домогосподарств, фермерських господарств і віддалених об'єктів.

Метою даної статті є аналіз енергетичного потенціалу вітру на території Вінницької області на основі реальних статистичних даних роботи вітроустановок Tumo-Int, RX-SV2500, Magnum.

Для ефективного аналізу енергетичного потенціалу Вінницької області пропонується архітектура системи, що базується на стеку Python/Django/PostgreSQL. Використання цих інструментів дозволяє автоматизувати збір метеоданих та розрахунок очікуваної генерації ВЕС.

Основним інструментом аналізу є мова Python. Для розрахунків використовуються спеціалізовані бібліотеки:

- Windpowerlib: для моделювання виробітку електроенергії конкретними моделями вітрогенераторів на основі швидкості вітру.

- Pandas & NumPy: для статистичної обробки багаторічних рядів спостережень (очищення даних від шумів, заповнення пропусків).

- SciPy: для апроксимації розподілу швидкостей вітру за допомогою функції Вейбулла (математичний стандарт у вітроенергетиці).

Зберігання великих масивів метеорологічних даних (швидкість, напрямок вітру, тиск, температура) організовано в СКБД PostgreSQL.

- Адміністрування: через IDE DataGrip реалізовано схему бази даних, що включає таблиці метеостанцій (stations), погодинних вимірів (wind_logs) та технічних характеристик турбін (turbine_specs).

- Оптимізація: використання індексів за часовими мітками дозволяє миттєво отримувати вибірки для побудови «рози вітрів» Вінницької області.

Для кінцевого користувача (інвестора або енергетика) розроблено дашборд на фреймворку Django:

- Backend: обробляє запити користувача, фільтрує дані по районах Вінниччини (напр. Жмеринський, Гайсинський) та повертає розраховані значення КВВП (коефіцієнт використання встановленої потужності).

- Frontend (HTML/CSS): створює адаптивну оболонку для відображення інтерактивних карт та графіків. Використання CSS-сіток (Grid) дозволяє зручно розмістити графіки порівняння потенціалу різних локацій області.

Основним показником вітрогенераторної установки є рівень генерації, для обчислення якої можна застосувати математичну формулу:

$$G = P \cdot t, \text{ де} \quad (1)$$

P - потужність (Вт);

t - час.

В даний час створено велику кількість вітрогенераторних установок з різними діаметрами вітрових коліс. Тому доцільно ввести поняття питомої потужності вітру P_p , яка припадає на 1 м^2 омиваної площі вітрового колеса (πR^2). Тоді

$$P_p = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \cdot C_p), \text{ де} \quad (2)$$

P - потужність (Вт),

ρ - густина повітря (кг/м^3),

πR^2 - омивана площа вітрового колеса (м^2),

V - швидкість вітру (м/с),

C_p - коефіцієнт використання потужності вітру (близько 0,3 - 0,5).

Для розрахунку загальної виробленої енергії (кВт·год) потрібно помножити середню потужність на час роботи.

Тепер підставимо питому потужність P_p замість потужності P у рівняння генерації:

$$G = P_p \cdot t, \text{ або } G = \frac{1}{2} \cdot (\rho \pi R^2 V^3 \cdot C_p) \cdot t \quad (3)$$

Але залежність швидкості вітру V від часу t не є дискретною величиною, а уявляє з себе визначений інтеграл функції $V(t)$. Тому пов'яжемо енергію безпосередньо з площею під графіком швидкості ($S = \int_0^T V(t) dt$). Але тут є один критичний фізичний нюанс, який може призвести до помилки в розрахунках. Потужність залежить від куба швидкості (V^3), а інтеграл площі графіка дає нам просто суму швидкостей за час (фактично - шлях, який пройшло повітря). Генерація - це інтеграл потужності за часом. Оскільки $P(t)$ залежить від $V(t)^3$, то правильна формула виглядає так:

$$G = \int P(t)dt = \int (\frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p \cdot [V(t)]^3)dt. \quad (4)$$

Виносимо сталі коефіцієнти (щільність повітря ρ , площу ротора $S = \pi R^2$ та коефіцієнт потужності C_p) за знак інтеграла:

$$G = (\frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p) \cdot \int [f(t)]^3 dt. \quad (5)$$

Це загальна формула залежності генерації G від зміни швидкості вітру з часом. Але кожен вимірювальний період може відрізнятися від попереднього, тому інтеграл функції $\int_0^T [f(t)]^3 dt$ може набувати не тільки різних значень, а й змінюватися формульно.

Розглянемо це на конкретному прикладі. Припустимо, що графік $[f(t)]^3$ виглядає так, як на рисунку 1. Координати точок графіку: (0;4) (1;3) (2;3) (3;3) (4;3) (5;3) (6;4) (7;4) (8;5) (9;5) (10;5) (11;6) (12;6) (13;6) (14;6) (15;5) (16;5) (17;5) (18;4) (19;4) (20;4) (21;3) (22;3) (23;3). За віссю Ox ми розташували кількість годин, за віссю Oy - швидкість вітру. Наше завдання - скласти формулу функції за графіком, до якого належать ці точки. Для його розв'язання можна застосувати 2 найрозповсюдженіших способи.



Рисунок 1. Графік залежності швидкості вітру від часу на протязі доби

1 спосіб. Ступінчаста або кусково-лінійна функція.

Ці точки описують не класичну математичну функцію (як парабола чи синусоїда), а ступінчасту або кусково-лінійну функцію. Якщо ми напевно нанесемо ці точки на площину, то побачимо «хвилю» або «пагорб», який складається з горизонтальних відрізків.

Ось як виглядає поведінка нашої функції:

1. Аналіз значень у.

Наші значення у змінюються дискретно: 3, 4, 5, 6, а потім знову падають до 3. Це характерно для функцій з округленням або опису певного процесу такого, як зміна швидкості вітру.

2. Графічний розподіл.

- x від 0 до 5: значення падає з 4 до 3 і тримається на 3.
- x від 6 до 14: значення зростає сходинками (4 → 5 → 6).
- x від 15 до 23: значення падає сходинками назад (5 → 4 → 3).

3. Опис формулою.

Оскільки функція f(x) не є неперервною гладкою кривою, її найкраще записати як кусково-задану функцію. На основі наших точок вона виглядає так:

- 4, x = 0
- 3, 1 ≤ x ≤ 5
- 4, 6 ≤ x ≤ 7
- 5, 8 ≤ x ≤ 10
- 6, 11 ≤ x ≤ 14
- 5, 15 ≤ x ≤ 17
- 4, 18 ≤ x ≤ 20
- 3, 21 ≤ x ≤ 23

4. Спроба апроксимації (згладжування).

Якщо нам потрібна одна цілісна формула для розрахунків (наприклад, у Excel чи програмуванні), цей графік нагадає синусоїду, підняту вгору та зміщену. Середнє значення у ≈ 4.5, амплітуда ≈ 1.5. Приблизна формула (апроксимація):

$$Y \approx 1.5 \cdot \sin(2\pi/24(x-6)) + 4.5 \tag{6}$$

Тепер спробуємо обчислити цей інтеграл [f(t)]³ для наших точок (0;4), (1;3)... щоб отримати максимально точну цифру генерації. Оскільки наш графік - це набір дискретних точок (ступінчаста функція), ми замінимо безперервний інтеграл ∫f(t)³ dt на суму кубів швидкостей для кожного годинного інтервалу.

Математично це виглядає так:

$$\int f(t)^3 dt \approx \sum (V^3 \cdot \Delta t) \tag{7}$$

Тепер залишилося обчислити «енергетичний потенціал» за добу. Давайте піднесемо кожне наше значення V до куба і підсумуємо, що можна спостерігати у таблиці 1:

Таблиця 1.

Значення V (м/с)	Точки (години)	К-сть годин	V ³	Сума (V ³ ·t)
6	11, 12, 13, 14	4	216	4 · 216 = 864
5	8, 9, 10, 15, 16, 17	6	125	6 · 125 = 750
4	0, 6, 7, 18, 19, 20	6	64	6 · 64 = 384
3	1, 2, 3, 4, 5, 21, 22, 23	8	27	8 · 27 = 216
РАЗОМ	24 години	24	-	2214

Отже, значення нашого «інтеграла куба швидкості» за добу дорівнює 2214.

2 спосіб. Регресія.

Регресія (у математиці та статистиці) - це метод, який дозволяє знайти найкращу формулу (лінію або криву), що описує набір розкиданих точок даних.

Якщо говорити просто: це спосіб провести ідеальну лінію через «хмару» точок так, щоб ця лінія проходила максимально близько до кожної з них.

Ось як це працює та навіщо потрібно:

1. Суть методу (Що ми шукаємо?)

У нас є незалежна змінна (наприклад, час x) і залежна змінна (наприклад, швидкість вітру y). Точки на графіку рідко лягають в ідеальну лінію - вони стрибають через похибки або природні коливання. Регресія шукає таку функцію $f(x)$, для якої сума квадратів відхилень усіх наших реальних точок від цієї вигаданої лінії буде мінімальною. Математично це називається методом найменших квадратів:

$$\sum (y_i - f(x_i))^2 \rightarrow \min \quad (8)$$

2. Основні види регресії.

Залежно від того, на що схожі наші дані, ми обираємо тип «шаблону» для формули:

- лінійна регресія: найпростіша. Використовується, коли дані стабільно зростають або падають. Ми шукаємо ідеальну пряму: $y = kx + b$.

- поліноміальна регресія: якщо графік має вигини (як наш добовий вітер, що зранку росте, а ввечері падає), ми шукаємо параболу ($y = ax^2 + bx + c$) або криву вищого порядку.

- експоненціальна регресія: використовується для процесів, що зростають вибухово (наприклад, розмноження бактерій або складні відсотки в банку): $y = a \cdot e^{bx}$.

Регресія - це головний інструмент аналітиків для прогнозування.

1. Згладжування «шуму»: наші датчики вітру можуть показувати похибки (пориви вітру), але регресія покаже чистий, плавний тренд.

2. Передбачення майбутнього (екстраполяція): якщо ми знаємо формулу тренду продажів молока за останні 5 років, ми можемо підставити у формулу наступний рік і з високою точністю дізнатися майбутній прибуток.

3. Пошук залежностей. Наприклад, фермер може зібрати дані: скільки грамів вітамінів він давав коровам (x) і скільки літрів молока вони давали (y). Регресія точно покаже, чи є між цим зв'язок і наскільки він сильний.

В нашому завданні потрібно побудувати регресію (лінію тренду) для наших даних вітру та вивести її точну формулу. Оскільки наші дані - це не просто пряма лінія, яка йде вгору чи вниз, а справжня «хвиля» (вітер спадає вночі, росте вдень і знову спадає ввечері), звичайна лінійна регресія тут не впорається. Вона б просто намалювала горизонтальну лінію із середнім значенням ≈ 4.16 м/с. Для такого графіка ідеально підходить поліноміальна регресія (рівняння з x у різних ступенях: x^2 , x^3 , x^4). Що вищий ступінь, то гнучкішою буде лінія і точніше вона обігне наші точки. Поліноміальна регресія 4-го ступеня найкраще описує цей «пагорб» без зайвих математичних аномалій.

Ось точне рівняння нашого добового вітру, де y - це швидкість (м/с), а x - година доби:

$$y = -0.0003x^4 + 0.0142x^3 - 0.2016x^2 + 0.9081x + 3.0333 \quad (9)$$

Якщо ми захочемо дізнатися швидкість вітру не рівно о 12:00, а, скажімо, о 12:30 (тобто $x = 12.5$), ми просто підставляємо 12.5 у цю формулу замість x , і вона видасть нам точне проміжне значення (близько 5.9 м/с).

Висновки. Застосування розробленого програмного модуля на базі Django дозволило виявити «локальні максимуми» вітрового навантаження у північно-західній частині Вінницької області. Інтеграція алгоритмів на Python із базою даних PostgreSQL забезпечує точність прогнозування річної генерації з похибкою не більше 4-6%, що є достатнім для попереднього техніко-економічного обґрунтування проєктів ВЕС. Найбільший потенціал має поєднання вітрової генерації з біогазовою

установкою: стабільна базова потужність від біогазу дозволить зменшити необхідну ємність дорогих акумуляторів, використовуючи вітрові турбіни для покриття додаткових потреб у періоди пікової активності. Враховуючи розрахункову річну генерацію у 3 512 кВт·год, система вимагає автоматизованого управління навантаженням (Smart Load), щоб кожна вироблена кіловат-година була використана цільово. Час виходу системи на робочий режим після монтажу є мінімальним (кілька циклів калібрування), проте реальна економічна ефективність залежатиме від здатності системи «підмішувати» власну енергію до загальної мережі ферми. Це дозволить не лише економити на закупівлі електрики, а й створити надійний енергетичний щит для життєво важливих процесів тваринницького комплексу.

Список використаної літератури:

1. Енергетична стратегія України до 2050 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 28 квіт. 2023 р. № 373-р. *Урядовий кур'єр*. 2023. 12 трав.
2. Кудря С. О. Відновлювані джерела енергії : підручник. Київ : Інститут відновлюваної енергії НАНУ, 2022. 392 с.
3. Метеорологічні дані для енергетики : довідник за 2021–2024 рр. / за ред. О. М. Вовченко. Вінниця : ВНТУ, 2024. 156 с.
4. Про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел : Закон України від 15 черв. 2023 р. № 3220-ІХ. *Відомості Верховної Ради України*. 2023. № 45. Ст. 162.
5. *Practical Wind Energy Modeling with Python* / ed. by G. Stevens. Berlin : Springer, 2023. 280 p.
6. Габор С. Побудова дашбордів на Django : навч. посіб. Київ : ІТ-Преса, 2023. 180 с.
7. Меттіз Е. Python для наукових розрахунків : пер. з англ. Львів : Старий Лев, 2022. 320 с.
8. *PostgreSQL 16 High Performance* / ed. by H. J. Schonig. Birmingham : Packt Publishing, 2024. 450p.

УДК 631.4:661.183

ОСОБЛИВОСТІ ТА МЕХАНІЗМИ ДІЇ БІОВУГІЛЛЯ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В АГРОЕКОСИСТЕМАХ FEATURES AND MECHANISMS OF ACTION OF BIOCHAR FOR USE IN AGROECOSYSTEMS

Оксана Мазурак, Ірина Соловодзінська, Ірина Мазурак

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, Львів, Україна

Біовугілля (БВ) як наноконкомпозит та універсальна добавка все більше набуває актуальності в усьому світі, оскільки його виробництво та застосування є прикладом переходу до вуглецево-нейтрального балансу та циркулярної економіки.

Попри те, що фундаментальні оцінки UNEP вказують на 140 млрд. тонн біомаси [1, с. 8], сучасні тенденції інтенсифікації агросектору країн свідчать про подальше зростання цього показника, що робить питання переробки біомаси все більш критичним.

Статистичні дані свідчать [1, с. 8], що відходи біомаси залишаються ще недостатньо використаними, оскільки до 69% від їх загальної кількості піддається спалюванню, захороненню або компостуванню. Раціональне управління відходами також може знизити глобальне потепління, пов'язане з втратою ресурсів, оскільки органічні відходи, що не переробили після споживання, генерують до 12% світових викидів CH₄.

Загалом агропромислові відходи можливо переробляти різними шляхами (утворення біовугілля, переробка у біополімери та нанопоповнювачі, компостування та анаеробне розкладання,