Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра енергозберігаючих технологій та енергетичного менеджменту

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

Комплексна оптимізація параметрів вітрогенератора для роботи в умовах помірних вітрових потоків

Виконав:
здобувач вищої освіти денної форми навчання освітнього ступеня «Бакалавр», освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
_____ **Артур ГОГУЛЯ**

Керівник: канд. екон. наук, доцент
_____ **Андрій ПЕЧЕНЮК**

Оцінка захисту:
Національна шкала_____
Кількість балів _____Шкала ECTS____

Допускається до захисту:
«____» _____2026 р.
Керівник проєктної групи (гарант) освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
кандидат економічних наук, доцент _____ **Ігор ГАРАСИМЧУК**

м. Кам'янець-Подільський, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП……3

1. Особливості та виклики помірних вітрових потоків……..…….7

2. Аеродинамічна оптимізація ротора……..12

3. Механічна оптимізація та концепція «Low Specific Power»……..18

4. Електрична оптимізація та алгоритми ККД……..……..27

5. Комплексна система керування вітровою електроустановкою…….35

6. Екологічні аспекти розвитку вітроенергетики……..……..41

ВИСНОВКИ.....50

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….…….……54

ДОДАТКИ

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку світової та вітчизняної енергетики характеризується масштабним довгостроковим трендом на декарбонізацію, диверсифікацію паливно-енергетичних ресурсів та стрімке впровадження відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). В умовах геополітичної нестабільності, руйнування централізованих енергомереж та гострої потреби у зміцненні енергетичної безпеки України, особливої ваги набуває розвиток децентралізованої генерації, зокрема вітроенергетики.

Традиційно промислова вітроенергетика орієнтується на прибережні, офшорні та гірські регіони, які характеризуються високим вітропотенціалом (середньорічна швидкість вітру понад 7,5…8,5 м/с). Проте значна частина території України, зокрема її центральні, західні та подільські регіони, розташована в континентальній зоні з помірними вітровими потоками, де середньорічна швидкість вітру на висоті приземного шару становить 4,0…6,5 м/с. Використання класичних вітроелектричних установок (ВЕУ) у цих локаціях є економічно неефективним, оскільки вони проектуванням заздалегідь адаптовані під високі швидкості вітру і в помірних умовах працюють із хронічним недовантаженням, демонструючи низький коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП на рівні 18-22%).

Вирішення цієї проблеми лежить у площині комплексної науково-технічної оптимізації параметрів ВЕУ. Перехід від концепції максимізації одиничної потужності до концепції низької питомої потужності («Low Specific Power»), удосконалення аеродинамічних характеристик ротора для низьких чисел Рейнольдса, мінімізація механічних втрат трансмісії та інтеграція високоточних цифрових алгоритмів керування електромагнітним моментом дозволяють суттєво знизити пусковий поріг турбіни й максимізувати знімання енергії з розрідженого повітряного потоку. Таким чином, наукове обґрунтування та комплексна оптимізація параметрів вітрогенератора для роботи в умовах помірних вітрових потоків є надзвичайно актуальним завданням, що має стратегічне значення для розширення географії використання вітроенергетики та підвищення стабільності локальних енергетичних систем.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи був пошук шляхів підвищення ефективності та енергетичної віддачі вітроелектричних установок в умовах континентальних регіонів із помірним вітропотенціалом шляхом розробки та обґрунтування комплексного підходу до оптимізації їхніх аеродинамічних, механічних та електричних параметрів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– дослідити фізико-механічні особливості помірних континентальних вітрових потоків, оцінити вплив шорсткості рельєфу на вертикальний градієнт швидкості та мікротурбулентність приземного шару повітря;

– обґрунтувати вибір оптимальних геометричних та аеродинамічних параметрів ротора (профілю, хорди, закону крутки лопаті) для забезпечення високої тримальної сили за низьких чисел Рейнольдса та низького пускового моменту;

– дослідити ефективність застосування інженерної концепції «Low Specific Power» (LSP) та безредукторного приводу на базі синхронних генераторів на постійних магнітах (Direct Drive PMSG) для мінімізації внутрішніх механічних втрат установки;

– розв'язати задачу конструктивної міцності та стабілізації структурних елементів ВЕУ (вежі, лопатей, головного підшипникового вузла) в умовах підвищеної інерційності LSP-систем та континентальних коливань вітру;

– розробити та дослідити цифрові алгоритми пошуку точки максимальної потужності та стратегії векторного керування струмом для оптимізації внутрішнього ККД генератора в режимах часткових навантажень;

– оцінити техніко-економічну ефективність запропонованих рішень та їхній вплив на інтегральний коефіцієнт використання встановленої потужності ВЕУ.

Об’єкт дослідження – процеси перетворення кінетичної енергії помірних вітрових потоків в електричну енергію за допомогою вітроелектричних установок змінної частоти обертання.

Предмет дослідження – аеродинамічні профілі, кінематичні схеми трансмісії, конструктивні параметри вежі та лопатей, а також алгоритми

цифрового керування та MPPT-трекінгу вітрогенераторів низької питомої потужності.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети та вирішення визначених завдань у роботі використано комплексний методологічний підхід, який базується на поєднанні фундаментальних положень сучасної енергетики, аеродинаміки, машинобудування та теорії автоматичного керування. Дослідження побудовано на застосуванні методів системного аналізу, теоретичного узагальнення та порівняння при вивченні специфіки помірних вітропотоків, а також на методах математичного і комп'ютерного моделювання для розрахунку параметрів ротора й вежі.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені методики, розрахункові моделі та алгоритми мають безпосередню практичну цінність для вітчизняних проектно-конструкторських організацій, що займаються впровадженням об'єктів розподіленої ВДЕ-генерації. Практичні рекомендації щодо вибору параметрів лопатей та веж можуть бути використані при локалізації виробництва компонентів ВЕУ континентального типу в Україні.

Розділ 1. Особливості та виклики помірних вітрових потоків

Робота вітроелектричних установок (ВЕУ) у зонах з помірними вітровими потоками (середньорічна швидкість $v_{avg} = 4{,}0…6{,}5$ м/с) суттєво відрізняється від проектування класичних «морських» турбін. Континентальні помірні вітри мають свою специфічну фізику, термодинаміку та просторовий розподіл [17].

Щоб ефективно знімати енергію з такого потоку, необхідно детально розібрати чотири фундаментальні проблеми.

Головний виклик помірних вітрів закладений у самому законі аеродинаміки. Кінетична енергія маси повітря m, що рухається зі швидкістю v, дорівнює:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Оскільки маса повітря, яка проходить через площу ометання ротора A за одиницю часу, залежить від швидкості ($m = \rho A v$), ми отримуємо кубічну залежність потужності від швидкості вітру:

$$P_w = \frac{1}{2}\rho A v^3$$

Для наочності порівняємо два регіони: узбережжя зі швидкістю вітру 10 м/с та внутрішній континент із помірним вітром 5 м/с (при однаковій площі ротора та щільності повітря $\rho = 1{,}225$ кг/м^3):

- при $v = 10$ м/с $\Rightarrow v^3 = 1000$;
- при $v = 5$ м/с} $\Rightarrow v^3 = 125$.

Таким чином, зменшення швидкості вітру вдвічі призводить до восьмикратного (на 87,5%) падіння доступної потужності потоку [4].

Через це в умовах помірних вітрів турбіна більшу частину часу працює в такій зоні регулювання, де ефективність перетворення енергії критично залежить від мінімальних коливань швидкості потоку.

У континентальних районах з помірними вітрами величезне значення має рельєф та шорсткість поверхні (ліси, пагорби, забудова). Вони створюють тертя, формуючи так званий приземний прикордонний шар. Швидкість вітру суттєво зростає з висотою. Цей ефект описується степеневим законом Гельмана:

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{\alpha}$$

де:

- v_1 та v_2 – швидкості вітру на висотах h_1 (опорна висота) та h_2 (висота осі ротора);
- α – коефіцієнт шорсткості поверхні (для відкритої місцевості $\alpha \approx 0{,}14$, для зон із деревами та будівлями $\alpha \approx 0{,}25…0{,}4$).

Наслідки високого градієнта (α):

1) Необхідність високих веж. Якщо на висоті 10 м швидкість вітру становить лише 3,5 м/с (нижче порогу запуску), то на висоті 100 м (при $\alpha = 0{,}25$) він становитиме:

$$v = 3.5 \cdot \left(\frac{100}{10}\right)^{0.25} = 3.5 \cdot 1.78 = 6.23 \text{ м/с}$$

Це вже робоча швидкість, при якій генерується реальна потужність. Тому для помірних вітрів висота вежі часто є критичнішою, ніж для морських ВЕУ [27].

2) Асиметричне навантаження на ротор. Верхня лопать (у зеніті) сприймає значно сильніший вітер, ніж нижня (у надірі). Це створює постійний перекошуючий момент на вал та редуктор, викликаючи втому металу та вимагаючи складних систем динамічного кроку лопатей (Independent Pitch Control).

Помірні вітри в континентальних умовах рідко бувають ламінарними (плавними). Вони характеризуються високим інтенсивним рівнем турбулентності (I_T):

$$I_T = \frac{\sigma}{\bar{v}}$$

Де δ – стандартне відхилення швидкості вітру, а v – середня швидкість.

Коли середня швидкість v низька (4-5 м/с), навіть невеликі локальні завихрення від дерев чи пагорбів створюють високе значення I_T.

Проблеми, викликані турбулентністю [1]:

- Зрив потоку – напрямок і швидкість вітру постійно та хаотично змінюються. Лопать не встигає підлаштовуватися, кут атаки виходить за оптимальні межі, і повітряний потік зривається з профілю, різко знижуючи ККД.
- Труднощі для трекінгу – флюгер та анемометр фіксують постійні зміни напрямку на 10^0-30^0. Якщо гондола буде постійно розвертатися за цими коливаннями, система повороту витратить на власні електродвигуни більше енергії, ніж згенерує турбіна, а механічні підшипники швидко зносяться.

Щоб вітрогенератор почав віддавати енергію в мережу, він має спочатку рушити з місця і розігнатися до робочих обертів. Це описується балансом моментів [24]:

$$J\frac{d\omega}{dt} = T_a - T_m - T_e$$

де J – момент інерції ротора, T_a – аеродинамічний момент, що створюється вітром, T_m – момент механічного тертя (у підшипниках та редукторі), T_e – електромагнітний момент генератора.

При слабкому вітрі (v < 3 м/с) виникає дві проблеми:

1) Числа Рейнольдса

($Re = \frac{v \cdot c}{\nu}$, де c — хорда лопаті, ν — кінематична в'язкість):

При малих швидкостях числа Рейнольдса падають нижче критичних значень (Re < 100,000). На поверхні лопаті утворюються так звані «ламінарні бульбашки відриву». Коефіцієнт лобового опору C_d стрімко зростає, а коефіцієнт підйомної сили C_l падає. Аеродинамічний момент T_a стає замалим.

2) «Сухе» тертя в трансмісії. Момент тертя спокою T_m (особливо в редукторах з великим передавальним числом) може бути більшим, ніж здатний створити слабкий вітер на нерухомому роторі. Ротор просто стоїть на місці, хоча енергії вітру теоретично вистачило б для підтримки обертання, якби він уже крутився.

Таким чином, для роботи в помірних вітрових потоках інженерам доводиться проектувати установки, що здатні:

- ловити розріджену енергію за рахунок величезних площ роторів;
- підніматися вище приземного турбулентного шару;
- мінімізувати внутрішнє механічне тертя для легкого старту;

- швидко адаптуватися до постійних змін швидкості та напрямку нестабільного континентального вітру.

Висновки до розділу 1

Головним викликом помірних вітрових потоків є різке кубічне падіння доступної потужності, що вимагає максимальної ефективності ВЕУ при кожній зміні швидкості вітру.

Висока шорсткість континентального рельєфу створює значний вертикальний градієнт швидкості, змушуючи розробників збільшувати висоту веж та враховувати асиметричні навантаження на ротор.

Підвищена мікротурбулентність та нестаціонарність приземних потоків призводять до частих зривів аеродинамічного потоку й ускладнюють роботу системи орієнтації турбіни на вітер.

Робота при низьких числах Рейнольдса та високий механічний момент тертя спокою трансмісії суттєво погіршують пускові характеристики установки, створюючи проблему для старту ротора при слабкому вітрові.

Розділ 2. Аеродинамічна оптимізація ротора

Аеродинамічна оптимізація ротора для умов помірних вітрів є найважливішим етапом проектування. Оскільки енергетичний потенціал потоку низький, турбіна повинна мати максимально можливий коефіцієнт потужності (C_p) у діаметрально протилежних режимах: від моменту рушання з місця до роботи на межі номінальної швидкості. Це досягається через глибоку модернізацію геометрії лопатей та ретельний підбір аеродинамічних профілів [26].

Класичні профілі авіаційного типу або профілі для потужних офшорних ВЕУ розраховані на високі числа Рейнольдса ($Re > 1 \cdot 10^6$). В умовах помірних вітрів лопать працює в діапазоні $Re = 1 \cdot 10^5 \ldots 5 \cdot 10^5$. За таких умов в'язкі ефекти повітря стають відчутнішими, що призводить до передчасного відриву ламінарного прикордонного шару та утворення «ламінарних бульбашок відриву».

Для запобігання цьому явищу застосовують спеціалізовані серії профілів (наприклад, NREL S822/S823 для кореня та кінчика лопаті або профілі DU (Delft University)) [5]:

1) Оптимізація відношення C_l/C_d. Головне завдання – максимізувати коефіцієнт підйомної сили (C_l) при мінімальному коефіцієнті лобового опору (C_d). Профілі для помірних вітрів мають вищу увігнутість ближче до задньої кромки, що дозволяє генерувати високу підйомну силу навіть при низьких швидкостях набігаючого потоку.

2) Геометрична еволюція вздовж радіуса лопаті.

- Коренева секція (0%-20% радіуса) має велику відносну товщину (до 35-40% від довжини хорди). Це необхідно не лише для забезпечення структурної міцності та витримання згинальних моментів, але й для створення високого аеродинамічного моменту при пуску. Тут використовуються профілі з тупою передньою кромкою.
- Середня та кінцева секції (20%-100% радіуса) – товщина стрімко зменшується до 15-18%. Профілі стають пласкішими та гострішими, забезпечуючи максимальну якість (відношення C_l/C_d) та мінімізуючи кінцеві завихрення [28].

Коефіцієнт швидкохідності (λ або TSR – Tip Speed Ratio) визначає співвідношення між лінійною швидкістю кінчика лопаті та швидкістю вітру:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v}$$

Для класичних вітрогенераторів оптимальний λ зазвичай лежить у межах 7…9. Однак для помірних вітрових потоків проектування зміщується в бік помірно-низької швидкохідності (λ_{opt} = 5,5…7).

Зниження розрахункового значення λ_{opt} дозволяє зробити лопаті ширшими (збільшити довжину хорди с вздовж усієї лопаті). Згідно з класичною теорією імпульсу елемента лопаті (BEM), оптимальна хорда описується формулою:

$$c(r) = \frac{8\pi r}{B \cdot C_l}(1 - \cos\phi)$$

де B – кількість лопатей, r – локальний радіус, φ – кут місцевого потоку. Ширша лопать у кореневій і середній зоні різко збільшує сумарну площу поверхні, яка взаємодіє з вітром. Це забезпечує вищий крутний момент за низьких обертів, полегшуючи старт турбіни [10].

Оскільки лінійна швидкість елемента лопаті ($u = \omega r$) лінійно зростає від нуля у центрі маточини до максимуму на кінчику, вектор відносної швидкості набігаючого потоку (v_{rel}) постійно змінює свій кут відносно площини обертання.

Щоб кожен переріз лопаті працював під своїм оптимальним кутом атаки (α_{opt}), де відношення C_l/C_d є максимальним, лопать проектують із суттєвою геометричною круткою (Blade Twist). Кут заклинювання (β) плавно змінюється вздовж радіуса:

- у корені лопаті кут β може досягати $+20^0 \ldots +25^0$ відносно площини обертання (лопать розвернута «обличчям» до вітру для кращого підхоплення потоку).
- на кінчику лопаті кут β зменшується майже до $0^0 \ldots +2^0$.

Для помірних вітрів закон крутки оптимізують так, щоб максимізувати інтегральний коефіцієнт C_p саме для швидкостей 4…6 м/с. Це означає агресивнішу крутку в середній частині лопаті, яка робить основний внесок у генерацію потужності в цих режимах [9].

Для того щоб «вичавити» максимум енергії зі слабкого потоку повітря, сучасні лопаті обладнують додатковими аеродинамічними елементами:

– Генератори вихорів – це невеликі пластини (плавці), які встановлюються на присмоктувальній (верхній) стороні лопаті, переважно ближче до кореневої частини. Вони штучно створюють

мікротурбулентність у прикордонному шарі. Цей турбулентний шар має вищу кінетичну енергію і значно довше утримується на поверхні лопаті, перешкоджаючи передчасному зриву потоку при малих швидкостях вітру та великих кутах атаки.

- Динохвости – зубчасті задні кромки на кінцях лопатей. В умовах низьких швидкостей вітру вони згладжують перехід потоку з лопаті у вільне середовище. Це не лише знижує акустичний шум (що критично для континентальних ВЕУ, розташованих близько до населених пунктів), але й дещо зменшує індуктивний опір ротора.
- Кінцеві шайби – загнуті кінчики лопатей (подібно до сучасних літаків). Вони зменшують перетікання повітря з зони високого тиску (нижня поверхня) в зону низького тиску (верхня поверхня) через торець лопаті, що ефективно збільшує віртуальне подовження лопаті без реального подовження радіуса і знижує втрати на кінцеве вихроутворення.

Аеродинамічна оптимізація ротора для помірних вітрів полягає у переході до спеціалізованих товстих профілів з високою підйомною силою для низьких чисел Рейнольдса, зниженні розрахункової швидкохідності задля розширення хорди лопаті, впровадженні агресивного закону геометричної крутки та інтеграції елементів пасивного керування потоком (генераторів вихорів).



Рис. 2.1. Аеродинамічна оптимізація ротора для помірних вітрів

Це дозволяє максимізувати знімання енергії з розрідженого потоку повітря.

Висновки до розділу 2

Аеродинамічна оптимізація ротора для помірних вітрів базується на переході до спеціалізованих профілів, адаптованих під низькі числа Рейнольдса. Використання геометрії з підвищеною увігнутістю задньої кромки дозволяє максимізувати коефіцієнт підйомної сили при слабких повітряних потоках.

Проектування турбіни під помірно-низьку швидкохідність забезпечує збільшення хорди лопаті та розширення її площі в кореневій і середній зонах. Така ширша геометрія суттєво підвищує крутний момент за низьких обертів, що полегшує первинне рушання ротора з місця.

Реалізація агресивного закону геометричної крутки гарантує утримання оптимального кута атаки по всій довжині лопаті в низькошвидкісних режимах.

Інтеграція генераторів вихорів у прикореневій зоні ефективно запобігає передчасному зриву ламінарного прикордонного шару повітря. Додаткове встановлення кінцевих шайб і зубчастих крайок мінімізує індуктивні втрати від завихрень, підвищуючи сумарний коефіцієнт потужності установки.

Розділ 3. Механічна оптимізація та концепція «Low Specific Power»

Для забезпечення рентабельності вітрогенерації в зонах із помірними вітровими потоками розробники змушені повністю переглянути класичні підходи до проектування мас, кінематики та структурної міцності. Фізика процесу вимагає, щоб механічна система ВЕУ мала мінімальний поріг чутливості до слабких енергетичних імпульсів і водночас витримувала специфічні динамічні навантаження, викликані геометричним дисбалансом [22].

Історично вітроіндустрія розвивалася шляхом збільшення щільності потужності: інженери намагалися зняти якомога більше мегават з кожного квадратного метра ометання ротора (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Історичні аспекти розвитку вітроіндустрії

Проте в умовах помірних вітрів континентальної Європи чи внутрішніх рівнин така стратегія веде до простою обладнання. Концепція Low Specific Power (LSP), або концепція низької питомої потужності, базується на зміні проектного коефіцієнта SP.

$$SP = \frac{P_n}{A} = \frac{4P_n}{\pi D^2}$$

де:

Pn – номінальна електрична потужність генератора [Вт];

A – площа ометання ротора [м²];

D – діаметр ротора [м].

Класична крива потужності вітротурбіни має три ключові точки: швидкість запуску ($v_{in} \approx 3…3.5$ м/с), швидкість виходу на номінал ($v_r \approx 11…12$ м/с) та швидкість відключення ($v_{out} \approx 25$ м/с) [18].

Впровадження концепції LSP радикально трансформує цю криву, зміщуючи її робочі точки ліворуч:

- Збільшення уловлювання енергії. Оскільки площа A зростає пропорційно квадрату радіуса лопаті, збільшення діаметра ротора на 20% дає приріст площі ометання майже на 44%. Це дозволяє збирати достатню масу повітря навіть при швидкості вітру 5 м/с.
- Зниження розрахункової швидкості номіналу (v_r). Для LSP-турбін точка v_r зміщується в діапазон 7,5…8,5 м/с. Завдяки цьому турбіна досягає своєї максимальної паспортної потужності в умовах, коли стандартна турбіна працювала б лише на 20-30% від своєї спроможності [3].

Головним економічним показником будь-якої електростанції є коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП – Capacity

Factor) – відношення фактично згенерованої енергії за рік до теоретичного максимуму при постійній роботі на номіналі.

Звичайна турбіна в умовах помірного вітру має КВВП на рівні 18-22%. Турбіна, оптимізована за принципом LSP, підвищує цей показник до 35-45%.

Енергосистема отримує не короткочасні сплески мегават під час рідкісних штормів, а стабільну, передбачувану та «гладку» базову генерацію протягом усього року [11].

Вибір архітектури приводу для слабких вітрів визначає обсяг внутрішніх втрат енергії. Порівняємо дві фундаментальні концепції: класичну редукторну (Geared) та прогресивну безредукторну (Direct Drive).



Рис. 3.2. Архітектури приводу для слабких вітрів

Традиційний триступінчастий мультиплікатор (зазвичай комбінація однієї планетарної та двох циліндричних передач) має фіксовані втрати на тертя, які мало залежать від поточної генерації:

- В’язкий опір оливи. Для змащення та охолодження важких шестерень використовується високосинтетична олива високої в'язкості. При низьких обертах ротора (8…12 об/хв) зусилля, необхідне для подолання гідродинамічного опору цієї оливної ванни, співмірне з усією корисною енергією слабкого вітру.
- Тертя в зачепленнях. Кожна пара шестерень знижує загальний ККД трансмісії. При часткових навантаженнях (коли вітер 4 м/с) ККД редуктора може падати з паспортних 97% до 80-85%.

Технологія Direct Drive на базі PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator). Повна відмова від редуктора усуває вищеописані проблеми. Ротор вітротурбіни жорстко сидить на одному валу з ротором великого синхронного генератора.

Оскільки швидкість обертання валу низька, для отримання промислової частоти струму генератор проектується з великою кількістю полюсів (до 100-150 полюсів). Це збільшує фізичні габарити (діаметр) самого генератора, але усуває механічний знос.

Головним викликом для PMSG є так званий «зубчастий момент» – прагнення постійних магнітів зафіксуватися напроти залізних зубців статора. Для його подолання в турбінах для помірних вітрів застосовують скошування пазів статора або оптимізацію форми полюсів магнітів (магніти з хемісферичним профілем). Це дозволяє знизити швидкість початку обертання до рекордних 1,5…1,8 м/с.

Збільшення діаметра ротора за концепцією LSP автоматично викликає критичне зростання статичних і динамічних навантажень. Відповідно до закону кубічного масштабування, якщо збільшити довжину лопаті вдвічі, її

об'єм і маса зростають у 8 разів (2^3), тоді як площа ометання – лише в 4 рази (2^2). Щоб уникнути появи надважкого ротора, інженери оптимізують внутрішню архітектуру лопаті.



Рис. 3.3. Матеріали лопастей вітрогенераторів

Матеріали нового покоління

- Гібридне армування. Основне тіло лопаті виготовляється за технологією вакуумної інфузії зі скловолокна та епоксидної смоли. Проте головні силові елементи – лонжеронні полиці, які сприймають основні згинальні навантаження від вітру, виконуються з пултрузійних профілів вуглепластику. Це дозволяє зробити лопать на 25-30% легшою і суттєво жорсткішою за стандартну.
- Термопластичні смоли. Замість традиційних реактопластів починають застосовувати термопластичні полімери для матриці лопаті. Вони мають кращі показники демпфування (гасіння) мікромеханічних коливань, які виникають через приземну турбулентність помірних потоків [21].

Для лопатей великої довжини критичною стає проблема аеропружної флаттерної нестабільності. Під дією поривів вітру довга лопать не просто згинається назад, вона починає скручуватися навколо своєї поздовжньої осі.

Щоб повернути це явище на користь, застосовують аеропружне проектування з пасивним зв'язком згину та кручення. Внутрішні шари вуглеволокна укладаються під певним розрахунковим кутом до осі лопаті. Коли сильний порив помірного вітру згинає лопать, вона автоматично скручується, зменшуючи локальний кут атаки (скидаючи надлишкове навантаження) без залучення активних сервоприводів гондоли.

Вихід у вищі шари атмосфери (на висоту 130…160 м за віссю ротора) є обов'язковою умовою для стабільної роботи LSP-турбін. Проте поєднання надвисокої вежі та ротора з величезним моментом інерції створює складні резонансні умови.

Вежа вітрогенератора є консольною балкою, що має власну фундаментальну частоту коливань (f_0). Під час роботи ротор створює два типи динамічних збурень:

- частота 1P – викликається дисбалансом мас ротора (з частотою обертання самого валу, наприклад, 0,15…0,25 Гц);
- частота 3P – викликається проходженням кожної з трьох лопатей повз вежу (створює аеродинамічний імпульс тиску з частотою, утричі більшою за 1P).

При проектуванні високих веж для помірних вітрів розрахунок ведеться так, щоб частота f_0 вежі знаходилася у вузькому безпечному коридорі між частотами 1P та 3P (так звана Soft-Stiff конструкція). Якщо

частоти збігатимуться, виникне механічний резонанс, який здатний зруйнувати анкерний фундамент установки за кілька місяців роботи.

Для стабілізації високих веж у верхній частині гондоли встановлюють керовані масові демпфери (Tuned Mass Dampers – TMD). Це важкий маятник або блок (масою в кілька тонн), з'єднаний із гідравлічними амортизаторами з електронним керуванням.



Рис. 3.4. Керовані масові демпфери вітрогенераторів

Коли приземний турбулентний порив вітру штовхає вежу вперед, маятник за інерцією зміщується назад, гасячи кінетичну енергію коливань сталевої конструкції та зменшуючи втому металу.

Через велике плече прикладання сили (величезний радіус лопатей) градієнт швидкості вітру створює постійний перекошуючий момент. Верхня лопать тягне гондолу вперед сильніше, ніж нижня, створюючи колосальний момент тангажу на головний підшипниковий вузол.

Замість класичної схеми з довгим головним валом та двома рознесеними підшипниками, у сучасних LSP-системах безредукторного

типу використовується один інтегрований дворядний конічний роликопідшипник великого діаметра (або пара зустрічно натягнутих підшипників), який встановлюється безпосередньо на передній стінці гондоли.

Цей підшипник сприймає всі згинальні сили та радіальні навантаження від ваги ротора і моментально скидає їх через литу чавунну раму гондоли на вежу, повністю ізолюючи внутрішні елементи генератора. Це дозволяє підтримувати стабільний магнітний зазор (Air Gap) між статором і ротором генератора, який становить усього 3…5 мм при діаметрі самого генератора понад 5-6 метрів.

Таким чином, механічна модернізація ВЕУ під умови помірних вітрів перетворює установку на високоадаптивну систему. Знижуючи питому потужність, прибираючи редуктор, полегшуючи лопаті вуглеволокном та впроваджуючи динамічні демпфери у високі вежі, інженери досягають безперебійної генерації струму навіть від найслабших, нестабільних приземних повітряних потоків континентальних регіонів.

Висновки до розділу 3

Концепція «Low Specific Power» радикально змінює підхід до проектування, передбачаючи штучне збільшення діаметра ротора при збереженні відносно невеликої номінальної потужності генератора. Таке геометричне переформатування дозволяє ВЕУ збирати значно більше енергії зі слабких потоків і зміщує криву генерації ліворуч, забезпечуючи вихід на номінал вже при швидкості вітру 7,5…8,5 м/с.

Повна відмова від класичного мультиплікатора на користь безредукторного приводу Direct Drive усуває в'язке тертя оливи та суттєво знижує пусковий момент для легкого старту установки. Застосування пултрузійних профілів із вуглепластику в силовому каркасі лопатей дозволяє зменшити їхню вагу на 25-30% та реалізувати пасивне аеропружне керування кутом атаки.

Будівництво надвисоких гібридних веж потребує суворого розрахунку резонансних частот у коридорі рішень Soft-Stiff та інтеграції керованих масових демпферів для гасіння динамічних коливань від великого ротора.

Впровадження інтегрованих дворядних конічних підшипників великого діаметра дозволяє ефективно скидати паразитні згинальні моменти на раму гондоли, надійно захищаючи міліметровий магнітний зазор безредукторного генератора.

Розділ 4. Електрична оптимізація та алгоритми ККД

Низька щільність та висока флуктуація помірних вітрових потоків ставлять жорсткі вимоги до електричної архітектури ВЕУ. Оскільки механічна потужність на валу турбіни постійно та хаотично змінюється, силова електроніка та цифрові алгоритми керування повинні миттєво підлаштовувати електричне навантаження генератора.

Головне завдання електричної оптимізації – утримання системи в точці максимальної аеродинамічної ефективності при змінній частоті обертання та мінімізація втрат при перетворенні енергії.

У класичних ВЕУ часто використовують асинхронні генератори подвійного живлення (DFIG), де через конвертор проходить лише 30% потужності (роторний ланцюг). Для помірних вітрів та систем Direct Drive з генераторами на постійних магнітах (PMSG) єдиним ефективним рішенням є повномасштабна конверторна топологія (Full-Scale Converter – BTB).

Уся згенерована електрична енергія проходить через послідовний ланцюг перетворень: «Змінний струм змінної частоти $\Rightarrow$ Постійний струм $\Rightarrow$ Змінний струм фіксованої частоти мережі (50 Гц / 60 Гц)».

Генераторний конвертор (Machine-Side Converter – MSC) працює як випрямляч з активним керуванням на базі IGBT- або SiC-транзисторів. Його головна функція – регулювання електромагнітного моменту генератора для забезпечення оптимальної швидкості обертання ротора.

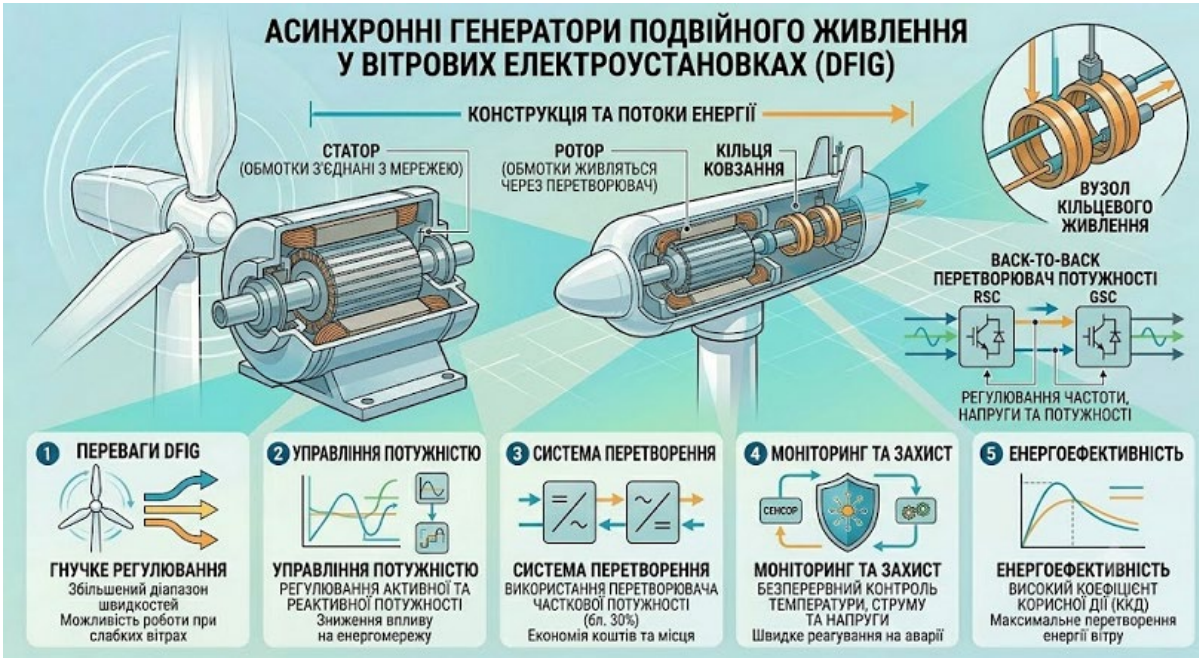


Рис. 4.1. Асинхронні генератори подвійного живлення у вітрових електроустановках

Ланка постійного струму (DC-link) – буферна зона з блоком конденсаторів, яка згладжує пульсації потужності, викликані мікротурбулентністю вітру, та ізолює динаміку генератора від збурень в енергосистемі.

Мережевий конвертор (Grid-Side Converter – GSC) працює як інвертор. Він синхронізується з напругою мережі та віддає туди високоякісну синусоїдальну енергію, одночасно забезпечуючи можливість генерації або споживання реактивної потужності за вимогою оператора системи розподілу.

Коефіцієнт потужності вітротурбіни C_p є нелінійною функцією, яка залежить від швидкохідності λ та кута кроку лопатей β. Для помірних вітрів лопаті зафіксовані в оптимальному положенні $\beta \approx 0^0$), тому C_p залежить

виключно від λ. На графіку ефективності існує лише одна точка, де досягається глобальний максимум $C_{p,max}$.

Щоб утримувати турбіну на вершині цієї кривої при зміні швидкості вітру v, електрична система керування повинна динамічно змінювати швидкість обертання ротора ω, підтримуючи оптимальне значення швидкохідності λ_{opt}. Для цього застосовують три базові алгоритми MPPT.

Керування за оптимальним моментом (Optimal Torque Control – OTC) – це найбільш стабільний та поширений алгоритм. В його основі лежить знання точних аеродинамічних характеристик ротора. Знаючи λ_{opt} та $C_{p,max}$, можна вичислити оптимальний механічний крутний момент, який вітер створює на валу:

$$T_{opt} = \frac{1}{2}\rho\pi R^5 \frac{C_{p,max}}{\lambda_{opt}^3}\omega^2 = k_{opt}\omega^2$$

Система керування постійно вимірює поточну кутову швидкість ротора ω, вираховує за цією формулою T_{opt} і миттєво дає команду генераторному конвертору (MSC) створити такий самий за величиною протидіючий електромагнітний момент: $T_e = T_{opt}$.

Керування за пропорційною швидкохідністю (Tip Speed Ratio Control) – цей алгоритм безпосередньо вимірює швидкість вітру v за допомогою ультразвукових анемометрів на гондолі та швидкість обертання ω Контролер вираховує поточний λ і через класичний ПІД-регулятор змінює навантаження генератора так, щоб мінімізувати помилку між поточним та еталонним значенням: $\Delta\lambda = \lambda opt - \lambda$.

Недоліком у цьому випадку є те, що анемометр на гондолі вимірює збурений лопатями потік повітря, що дає похибку при слабких вітрах.

Пошук з обуренням (Perturb and Observe – P&O) або HCS (Hill Climb Searching) – це інтелектуальний алгоритм, який взагалі не потребує датчиків вітру чи знання аеродинаміки лопаті. Контролер крок за кроком штучно змінює (збурює) швидкість обертання генератора ω на величину Δω і аналізує вихідну електричну потужність P_e:

Якщо

$$\frac{\Delta P_e}{\Delta \omega} > 0,$$

це означає, що система рухається вгору по кривій C_p. Наступний крок збурення робиться в тому ж напрямку.

Якщо

$$\frac{\Delta P_e}{\Delta \omega} < 0,$$

система перейшла пік і почала спускатися. Напрямок зміни швидкості негайно змінюється на протилежний.

В умовах помірних вітрів ВЕУ більшу частину життєвого циклу працює в режимі часткового навантаження (на рівні 15-40% від номінальної потужності). За таких умов класичні алгоритми керування струмом призводять до значних втрат у мідних обмотках статора та залізі музпідводу

генератора. Для оптимізації внутрішнього ККД застосовують дві передові стратегії векторного керування.

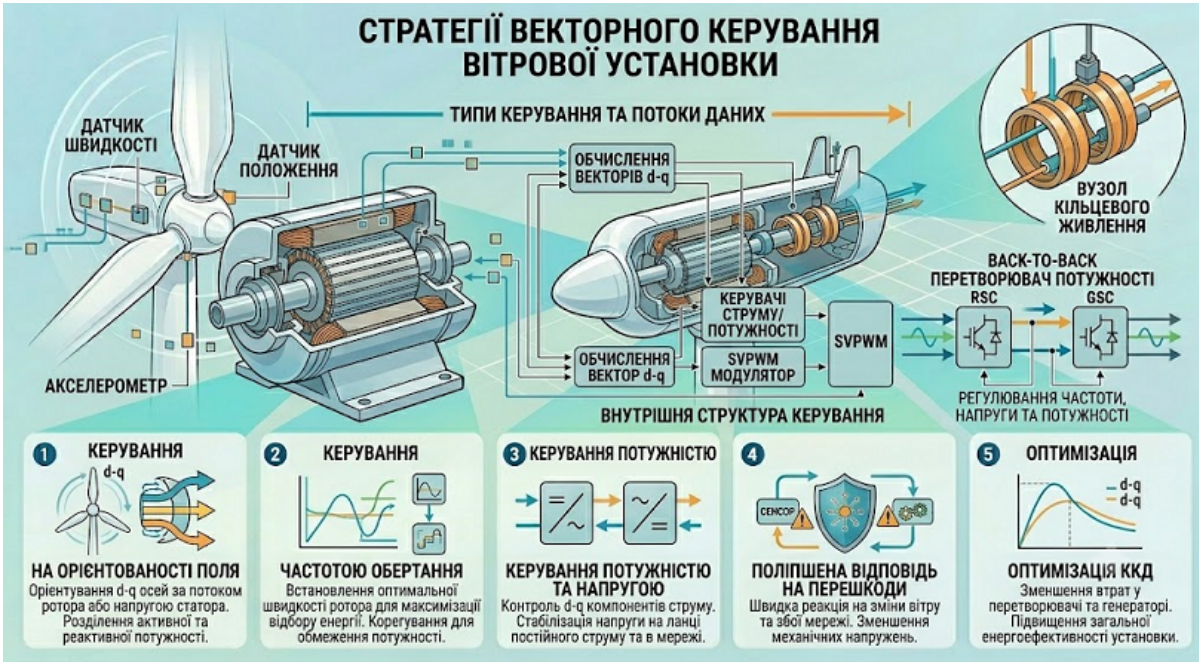


Рис. 4.2. Стратегії векторного керування вітрової установки

Стратегія MTPA (Maximum Torque Per Ampere). При векторному керуванні (Field-Oriented Control) струм статора розділяється на дві складові: I_d (регулює магнітний потік) та I_q (регулює крутний момент).

Для синхронних генераторів із постійними магнітами, що мають явні полюси ($Ld \neq Lq$), крутний момент складається з електромагнітного та реактивного моментів.

Алгоритм MTPA обчислює таке математичне співвідношення між струмами Id та Iq, яке дозволяє отримати необхідний для MPPT крутний момент за абсолютного мінімуму амплітуди повного струму статора. Це радикально знижує теплові втрати Джоуля-Ленца ($I2 \cdot R$) в обмотках генератора при слабкому вітрові.

Стратегія максимізації ККД (Maximum Efficiency – ME). При дуже малих швидкостях обертання втрати у сталі (від перемагнічування та

вихрових струмів Фуко) стають сумірними з втратами в міді. Стратегія ME використовує онлайн-модель втрат генератора (Loss Minimization Model). Вона динамічно коригує струм поздовжньої осі Id, послаблюючи або посилюючи сумарний магнітний потік у повітряному зазорі, щоб досягти ідеального балансу між магнітними та електричними втратами для кожної мікроточки потужності.

У класичних інверторах ВЕУ використовуються кремнієві (Si) IGBT-транзистори. Проте при роботі з помірними вітрами, коли важливий кожен ват, вони мають високі статичні та динамічні втрати на перемикання.

Сучасні LSP-турбіни переходять на напівпровідники з широкою забороненою зоною – SiC (Silicon Carbide):

- Зниження втрат – транзистори SiC знижують загальні втрати енергії в конверторі на 30-50% порівняно з кремнієвими аналогами в режимах низької та середньої генерації.
- Вища частота перемикань дозволяє підвищити частоту ШІМ (широтно-імпульсної модуляції), що значно покращує якість вихідного струму (зменшує коефіцієнт гармонік THD) та зменшує габарити і тепловиділення вихідних фільтрів.

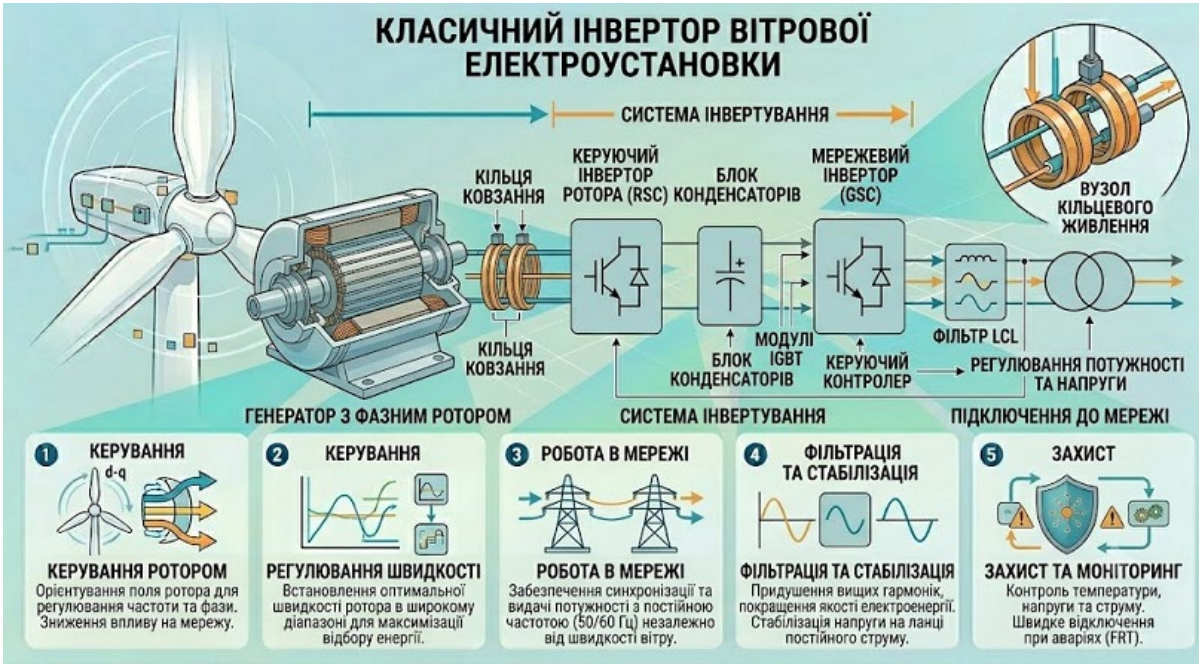


Рис. 4.3. Класичний інвертор вітрової електроустановки

Таким чином, електрична оптимізація перетворює вітрогенератор на гнучку інтелектуальну електростанцію. Завдяки повномасштабній конверторній архітектурі, адаптивним алгоритмам MPPT та стратегіям векторного керування MTPA/ME, система витискає максимальний можливий ККД з генератора навіть за умов слабкого, постійно флуктуючого помірного вітру, забезпечуючи при цьому високу якість струму для енергомережі.

Висновки до розділу 4

Електрична оптимізація ВЕУ для помірних вітрів базується на впровадженні повномасштабної конверторної архітектури (Full-Scale Converter), яка повністю ізолює нестабільну динаміку генератора від вимог загальної енергомережі.

Застосування цифрових алгоритмів MPPT, зокрема керування за оптимальним моментом (ОТС) та пошуку з обуренням (P&O), дозволяє системі миттєво підлаштовувати частоту обертання ротора для утримання максимального коефіцієнта потужності $C_{p,max}$.

Впровадження стратегій векторного керування струмом МТРА та МЕ забезпечує мінімізацію теплових втрат в обмотках і магнітних втрат у сталі, що кардинально підвищує внутрішній ККД генератора в режимах часткових навантажень.

Перехід на силову електроніку нового покоління на базі карбіду кремнію (SiC) додатково знижує статичні та динамічні втрати на перемикання інвертора, дозволяючи ефективно використовувати кожен ват енергії слабкого повітряного потоку.

5. Комплексна система керування вітровою електроустановкою

Для вітроелектричних установок, що працюють в умовах помірних вітрових потоків, система автоматичного керування є головним інструментом забезпечення ефективності. Якщо у регіонах із сильними вітрами першочерговим завданням систем Pitch (регулювання кута повороту лопатей) та Yaw (орієнтація гондоли за вітром) є обмеження надлишкової потужності та захист конструкції від руйнування, то в низькошвидкісних континентальних зонах фокус повністю зміщується на максимізацію уловлювання енергії та адаптацію до високої турбулентності.

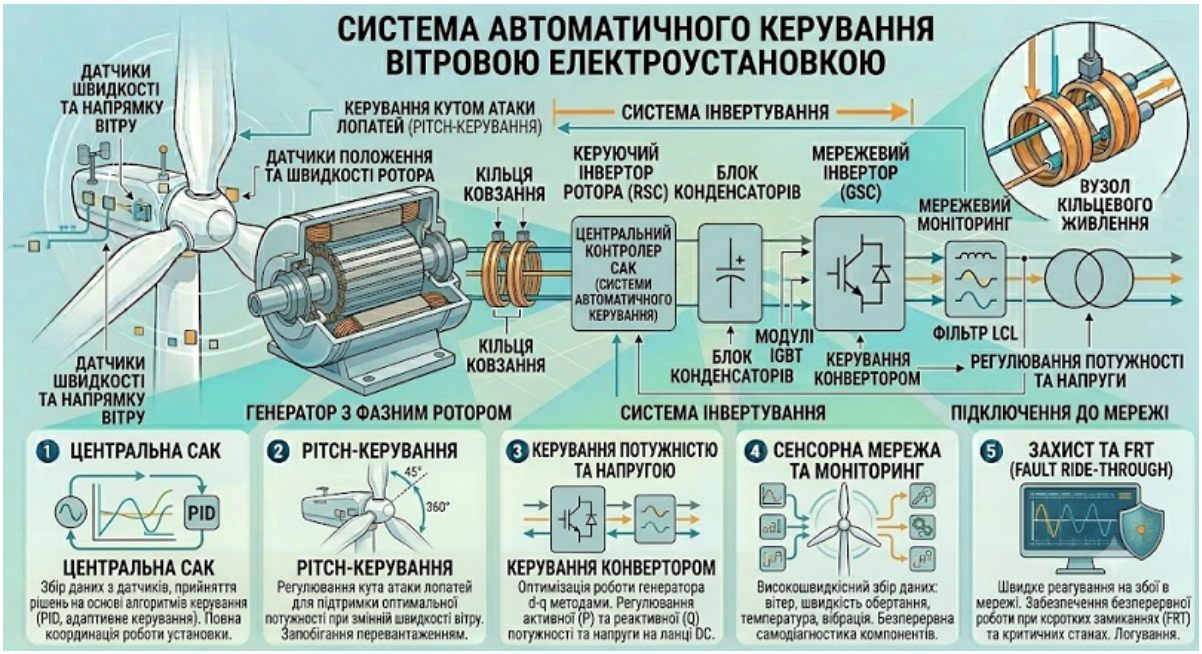


Рис. 5.1. Система автоматичного керування вітровою електроустановкою

Класична система Pitch Control обертає лопаті навколо їхньої поздовжньої осі за допомогою гідравлічних або електричних сервоприводів. В умовах помірних вітрів (робота в Зоні II, тобто від швидкості запуску до номіналу) лопаті зазвичай утримуються в положенні максимальної аеродинамічної ефективності $\beta_{opt} \approx 0^0$). Проте для слабких потоків алгоритм роботи цієї системи зазнає суттєвих змін.

Як було зазначено у першому розділі, головною проблемою є високий момент сухого тертя спокою у підшипниках та генераторі. Коли нерухома лопать стоїть під робочим кутом $\beta = 0^0$, слабкий вітер (2…3 м/с) обтікає її під занадто великим кутом атаки, викликаючи повний аеродинамічний зрив. Підйомна сила не виникає, і ротор залишається нерухомим.

Перед запуском система Pitch розгортає лопаті на великий кут заклинювання ($\beta = +15^0 \dots +25^0$). Це штучно зменшує кут атаки набігаючого слабкого вітру, дозволяючи йому безвідривно обтікати профіль.

Отриманий стартовий аеродинамічний момент долає тертя спокою, і ротор починає рух. У міру розгону ротора ($\omega\uparrow$) система Pitch плавно повертає лопаті назад до робочого положення $\beta = 0^0$.

Континентальний вітер має високий вертикальний градієнт (швидкість суттєво відрізняється на висоті 80м та 160 м). Коли лопать проходить верхню точку (зеніт), вона створює колосальний момент, що згинає її назад, а в нижній точці (надір) навантаження різко падає.

- Замість колективного керування (Collective Pitch Control), коли всі три лопаті повертаються на однаковий кут, в умовах помірних вітрів впроваджують алгоритми IPC.

– Комп'ютер керування кожні кілька мілісекунд зчитує покажчики з тензодатчиків, інтегрованих у корінь кожної лопаті. Коли лопать іде вгору, сервопривід мікроскопічно «зафлюгерює» її (β збільшується на $0{,}5^0 \ldots 1{,}5^0$), зменшуючи навантаження. Коли лопать іде вниз – кут зменшується, максимізуючи тягу. Це компенсує перекошуючі моменти тангажу й рискання та продовжує ресурс несучої конструкції.

Система Yaw Control (керування орієнтацією на вітер) забезпечує розворот усієї багатотонної гондоли разом із ротором навколо вертикальної осі вежі за допомогою системи електродвигунів та зубчастого вінця. Оптимальний кут рискання (Yaw angle γ) має дорівнювати нулю, тобто вісь ротора повинна бути строго паралельною вектору вітру. Якщо виникає кут ковзання ($\gamma \neq 0$), корисна площа ометання зменшується як $\cos\gamma$, а потужність падає пропорційно $\cos^3\gamma$.

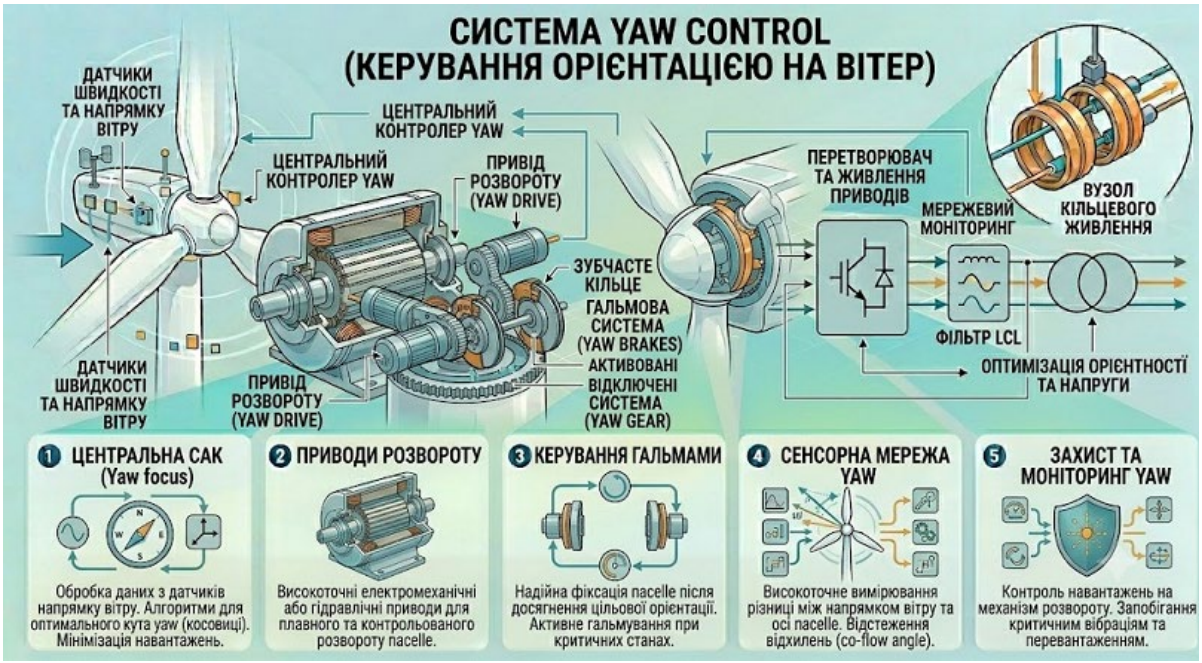


Рис. 5.2. Система Yaw Control (керування орієнтацією на вітер)

Для помірних континентальних вітрів характерна висока нестаціонарність: напрямок вітру через місцеві пагорби чи лісосмуги постійно коливається на $\pm 15^0 \ldots 20^0$ із частотою в кілька секунд.

Якщо система Yaw реагуватиме на кожен такий порив, електродвигуни повороту гондоли працюватимуть безперервно. Це призведе до від'ємного енергетичного балансу (на роботу приводів витратиться більше енергії, ніж додасться від точної орієнтації) та критичного зносу гальмівних накладок і редукторів системи Yaw.

Для подолання цього виклику застосовують алгоритми з динамічним вікном усереднення та нечіткою логікою (Fuzzy Logic Control):

- Інтегральний аналіз тренду. Система не реагує на миттєві коливання. Дані з ультразвукових датчиків вітру (анеморумбометрів) згладжуються за допомогою ковзного середнього з часовим вікном від 10 до 30 секунд.
- Адаптивна зона нечутливості. Встановлюється поріг активації системи. Якщо середня швидкість вітру низька (4 м/с), зона нечутливості розширюється до $\pm 8^0 \ldots 10^0$, оскільки втрати від косого обтікання при слабкому вітрі менші, ніж енергетичні затрати на розворот гондоли. При збільшенні швидкості до 7…8 м/с зона нечутливості звужується до $\pm 2^0 \ldots 3^0$.

Найбільш прогресивним кроком у комплексній оптимізації Pitch & Yaw для великих роторів за помірного вітру є перехід від реактивного керування (зворотний зв'язок за фактом події) до проактивного (випереджального) керування. Для цього на даху гондоли встановлюють лазерний радар — LiDAR (Light Detection and Ranging).

Принцип роботи системи LiDAR у комплексному керуванні. Лазерні промені сканують простір попереду турбіни на відстані 50…200 метрів. Аналізуючи доплерівське зміщення частоти відбитих від мікрочастинок пилу сигналів, тривимірна модель вітру будується до того, як цей потік досягне лопатей турбіни (інформація надходить із випередженням у 2…5 секунд).

Якщо LiDAR фіксує наближення локального різкого затишшя або, навпаки, приземного пориву, система Pitch Control заздалегідь починає змінювати кут нахилу лопатей, плавно підлаштовуючи їх під майбутні параметри потоку. Це повністю виключає аеродинамічний зрив.

Випереджальне знання про стійку зміну напрямку фронту вітру дозволяє системі розвороту почати плавне переміщення гондоли заздалегідь, зводячи кутову похибку косого обтікання до мінімуму в момент зустрічі ротора з повітряною масою.

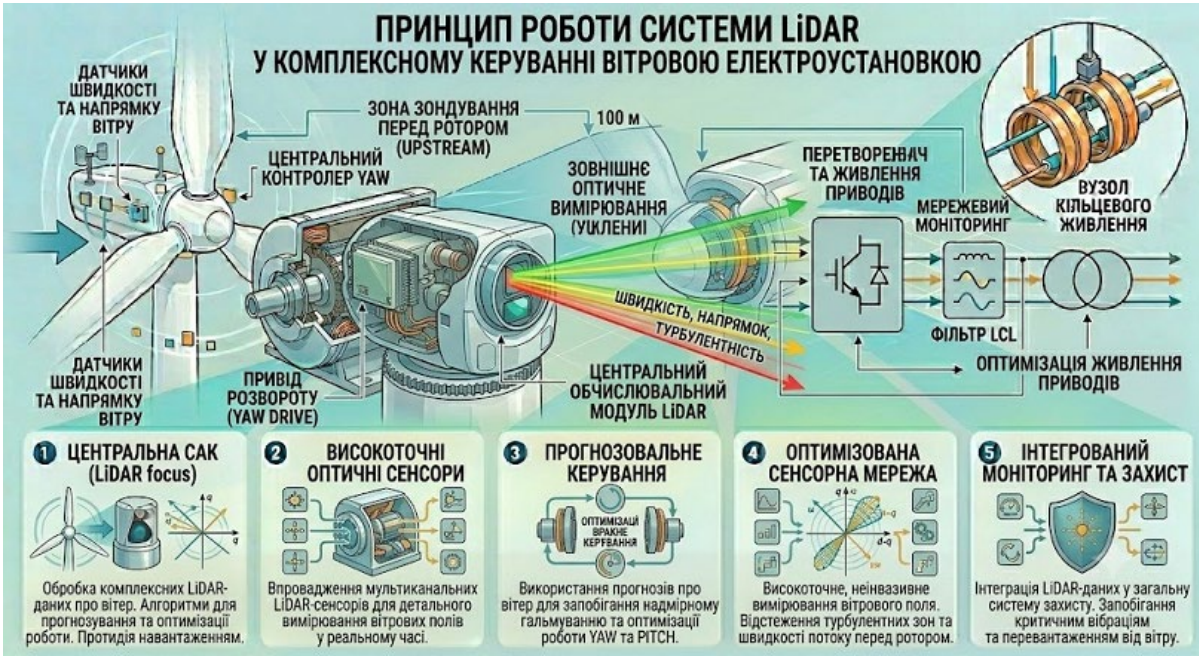


Рис. 5.3. Принцип роботи системи LiDAR у комплексному керуванні вітровою електроустановкою

Таким чином, комплексна система керування Pitch & Yaw в умовах помірних вітрів виступає інтелектуальним ядром ВЕУ. Завдяки алгоритмам асистованого пуску лопатей та індивідуального кроку (IPC) долається поріг сухого тертя та нівелюються руйнівні асиметричні навантаження від вертикального градієнта вітру. Разом з адаптивними алгоритмами фільтрації напрямку (Yaw) та лазерними системами LiDAR, це забезпечує безперервну роботу турбіни на межі її максимальної теоретичної ефективності навіть у нестабільних континентальних повітряних масах.

Висновки до розділу 5

Комплексна система керування Pitch & Yaw в умовах помірних вітрів переорієнтована з функцій захисту конструкції на завдання максимізації уловлювання енергії та адаптації до високої приземної турбулентності.

Впровадження алгоритму асистованого пуску (Pitch-Assisted Start) дозволяє за рахунок тимчасового збільшення кута заклинювання лопатей долати поріг сухого тертя трансмісії та забезпечувати легкий старт ротора при слабкому вітрі.

Використання індивідуального регулювання кроку кожної лопаті (IPC) ефективно нівелює руйнівні перекошуючі моменти, що виникають через суттєвий вертикальний градієнт швидкості повітряного потоку.

Оптимізація системи розвороту гондоли (Yaw) за допомогою нечіткої логіки та випереджальних лазерних радарів LiDAR мінімізує втрати від косого обтікання й запобігає передчасному зносу механізмів в умовах постійної зміни напрямку континентального вітру.

Розділ 6. Екологічні аспекти розвитку вітроенергетики

Сучасна екологічна парадигма вимагає, щоб будь-яке джерело відновлюваної енергетики оцінювалося не лише за критерієм відсутності викидів парникових газів, а й через призму повного життєвого циклу (від видобутку сировини до декомісії), а також за ступенем його локального впливу на екосистеми.

Глибокий аналіз взаємодії вітроелектричних установок із навколишнім середовищем дозволяє чітко розмежувати глобальні кліматичні переваги та локальні екологічні ризики, виявивши інженерні компроміси, які роблять цей вид генерації максимально дружнім до біосфери.

Головний екологічний аргумент на користь ВЕУ – радикальне зниження антропогенного тиску на атмосферу під час експлуатаційної фази. На відміну від традиційної теплової генерації, вітротурбіни здійснюють пряме заміщення викопного палива без споживання кисню та виділення продуктів згоряння.

За середніми розрахунками для європейського енергетичного сектору, кожна згенерована вітропарком кіловат-година (1 кВт · год) електроенергії запобігає викиду:

- 600…900 г CO_2 (залежно від того, заміщує вона вугільну чи газову генерацію);
- 1,5…3,0 г SO_2 (головний чинник виникнення кислотних дощів);
- 1,0…2,.0 г NO_x (руйнівники озонового шару та джерело фотохімічного смогу).

Для об'єктивності слід враховувати «непрямі» викиди, що виникають під час виробництва компонентів ВЕУ. Видобуток залізної руди, виплавка сталі для вежі, синтез епоксидних смол для лопатей та виготовлення тисяч тонн цементу для фундаменту супроводжуються значними викидами парникових газів.

Застосування міжнародних стандартів ISO 14040/14044 для аналізу життєвого циклу ВЕУ показує такі результати:

- Питомий вуглецевий слід – інтегральний викид ВЕУ за весь життєвий цикл (включаючи утилізацію) становить усього 11…22 г CO_2 екв./кВт · год. Для порівняння: у вугільних ТЕС цей показник становить 820…1000 г, у газових станціях комбінованого циклу – 410…490 г.
- Енергетичний період окупності (EPBT) – коефіцієнт чистої енергетичної віддачі (Net Energy Ratio) сучасних континентальних турбін перевищує 40. Це означає, що за перші 6-9 місяців роботи турбіна повністю генерує ту кількість енергії, яка була витрачена на її створення, а решту 20-25 років працює з нульовим екологічним балансом.

Будь-яке обертове тіло великих розмірів неминуче генерує звукові хвилі. У ВЕУ акустичне випромінювання поділяється на два принципово різні за своєю природою типи: механічне та аеродинамічне.

Генерується всередині гондоли внаслідок вібрації шестерень мультиплікатора, роботи систем охолодження, зачеплення зубчастих передач системи Yaw та гудіння обмоток генератора.

У сучасних турбінах, адаптованих до помірних вітрів, цей шум практично нівельовано. Використання безредукторного приводу (Direct Drive PMSG) усунуло головне джерело високочастотного гудіння – редуктор. Сама гондола зсередини покривається масивними звукопоглинальними сендвіч-панелями, а головні вузли встановлюються на еластомерних віброізолюючих опорах.

Аеродинамічний шум виникає через взаємодію рухомої лопаті з повітряним потоком і безпосередньо залежить від швидкості кінчика лопаті ($v_{tip} = ώR$). Основним джерелом звуку є задня кромка лопаті (Trailing Edge Noise), де утворюються турбулентні мікровихори при зливанні потоків з верхньої та нижньої поверхонь.

Оскільки потужність шуму пропорційна швидкості лопаті у п’ятому ступені, для помірних вітрів проектне зниження швидкохідності автоматично зменшує рівень акустичного тиску.

Додатково на лопаті встановлюють динохвости (Serrated Trailing Edges) – пилкоподібні накладки на задню кромку. Вони руйнують когерентну структуру вихорів, плавно змішують шари повітря та знижують рівень шуму на 2…4 дБ, роблячи звук турбіни м'яким шурхітом, який на відстані 300 м повністю маскується природним фоном листя чи трави.

Інфразвук (коливання з частотою нижче 20 Гц) довгий час безпідставно звинувачували у негативному психосоматичному впливі на людей. Фізична суть виникнення інфразвуку у ВЕУ – це імпульс тиску, який виникає в мить, коли лопать проходить повз вежу («ефект витіснення повітря»).

Численні незалежні дослідження (наприклад, Федерального відомства з охорони навколишнього середовища Німеччини – UBA) довели:

- Рівень інфразвукового тиску від мегаватних ВЕУ на відстані 300 метрів становить близько 50…60 дБ, що значно нижче за поріг людського сприйняття (який на частоті 10 Гц становить не менше 90 дБ).
- Автомобіль, що рухається зі швидкістю 80 км/год, або звичайний побутовий вентилятор створюють у рази сильніше інфразвукове навантаження на людину, ніж сучасна вітротурбіна.

Пряма взаємодія обертових лопатей з птахами та кажанами – найбільш чутливий аспект локального екологічного впливу вітроенергетики.

Статистично, вітрогенератори є причиною менш ніж 0,01% від усіх антропогенних випадків загибелі птахів (поступаючись скляним фасадам хмарочосів, лініям електропередач та домашнім котам). Проте небезпека зростає, якщо вітропарк перетинає трансконтинентальні шляхи міграції або зони гніздування рідкісних хижаків (орланів, беркутів).

Сучасні інженерні методи захисту включають:

- Пасивне візуальне маркування. Дослідження Норвезького інституту досліджень природи (NINA) показали, що фарбування однієї з трьох лопатей вітротурбіни у чорний або темно-зелений колір знижує смертність птахів на 70%. Це усуває ефект «розмиття руху», і птах встигає вчасно помітити перешкоду.
- Активні системи з комп'ютерним зором – інтеграція систем типу IdentiFlight. На вежі встановлюються кругові камери високої роздільної здатності з оптичними датчиками. Нейромережа в реальному часі виявляє наближення птаха, класифікує його вид за силуетом і траєкторією польоту, і, якщо це червонокнижний хижак,

автоматично дає команду на підгальмовування та поворот лопатей у флюгерний стан задовго до підльоту птаха.

Кажани гинуть біля ВЕУ не через механічні удари (їхня ехолокація дозволяє фіксувати тверді тіла), а через синдром баротравми. На присмоктувальній стороні лопаті та за її кінчиком формується глибокий аеродинамічний вакуум (локальне падіння тиску на 5…10 кПа). Коли ссавець потрапляє в цю зону, через миттєве розширення газів у його тілі відбувається розрив капілярів легень.

Кажани вилітають на полювання за дуже специфічних умов: сутінки/ніч, температура повітря вище $+10^0$C та низька швидкість вітру (менше 5 м/с, коли їх не зносить потоком повітря).

Сучасні системи автоматизації ВЕУ містять екологічний модуль керування: при збігу цих параметрів турбіна штучно збільшує швидкість запуску до 5,5 м/с і зупиняє обертання ротора. Оскільки при таких швидкостях вітру генерація й так мінімальна, річні економічні втрати власника ВЕУ не перевищують 0,5-1%, але смертність кажанів падає практично до нуля.

Великі концентрації ВЕУ (масиви з десятків турбін) змінюють динаміку нижнього прикордонного шару атмосфери.

Вітротурбіна вилучає кінетичну енергію з вітру, створюючи за ротором так званий слід турбіни (Wake Effect), що характеризується зниженою швидкістю та підвищеною турбулентністю. У нічний час, коли спостерігається температурна інверсія (холодне повітря внизу, тепле – вгорі), обертання лопатей перемішує ці шари. Це призводить до незначного прогріву приземного шару (на 0,5…1,0^0C) та збільшення випаровування

вологи з ґрунту, що необхідно враховувати при плануванні агрокомплексів навколо вітропарків.

Безпосередньо фундамент та під'їзні шляхи вилучають з обігу не більше 1-2% від загальної площі вітропарку. Решта території залишається повністю придатною для ведення інтенсивного сільського господарства. Тварини (як дикі, так і свійська худоба) швидко звикають до монотонного шурхоту турбін і випасаються безпосередньо біля підніжжя веж без ознак хронічного стресу.

Найгострішим екологічним викликом сучасної вітроенергетики є декомісія (виведення з експлуатації) установок перших поколінь. Якщо генератор, силові кабелі, трансформатори та сталева вежа легко утилізуються і на 98% повертаються в металургійний оборот, то лопаті довгий час залишалися баластом для екології.

Лопаті виготовляються з шаруватих скло- та вуглеволокон, просочених термореактивними полімерами (епоксидними чи поліефірними смолами). Процес полімеризації є незворотним: смолу неможливо розплавити та сформувати заново, як звичайний пластик.



Рис. 6.1. Сучасна матриця переробки лопатей

На сьогодні розроблено та активно впроваджуються три технологічні підходи до утилізації лопатей:

1) Цементний ко-процесинг (сумісне спалювання) – лопаті розрізають мобільними пилками безпосередньо на майданчику ВЕУ та транспортують на цементні заводи. Там їх подрібнюють на фракцію. Скловолокно замінює собою силікати (пісок), які необхідні для рецептури цементного клінкеру, а полімерна смола згоряє як паливо з високою теплотворною здатністю, заміщуючи вугілля. Це дозволяє утилізувати 100% маси лопаті без утворення вторинних відходів.
2) Високотемпературний піроліз – нагрівання подрібненого композиту в безкисневих камерах при температурах +450…600^{0}C. Органічна смола розпадається на піролізний газ та синтетичні оливи (які повертаються в хімічну промисловість), а на дні залишається чисте скло- чи вуглеволокно. Отримане вторинне волокно має на 80-90% такі самі механічні властивості, як і первинне, і повторно

використовується для армування бамперів автомобілів, корпусів човнів або побутової техніки.

3) Хімічний сольволіз та розкладні смоли (кругова економіка) – світові лідери індустрії (Vestas, Siemens Gamesa) з 2024-2025 років повністю перейшли на виготовлення лопатей за технологіями типу Recyclable Blade. У них застосовуються спеціальні епоксидні смоли з оптимізованими хімічними зв'язками. Після завершення терміну служби таку лопать занурюють у спеціальний слабкий розчин на основі амінів та кислот при помірній температурі. Смола повністю розчиняється, розділяючись на вихідні базові мономери, а чисте волокно виймається з ванни і готове для намотування нових лопатей наступного покоління.

Висновки до розділу 6

Результати комплексного аналізу життєвого циклу підтверджують екологічну перевагу ВЕУ: питомі викиди парникових газів становлять не більше 22 г CO_2 -екв./кВт·год, а повна енергетична окупність витрат на виробництво досягається за перші 6-9 місяців роботи установки.

Локальний акустичний вплив вітрогенераторів на навколишнє середовище успішно нівельовано завдяки переходу на безредукторну кінематику Direct Drive та інтеграції аеродинамічних пилкоподібних накладок на задні кромки лопатей.

Доведено, що системні ризики для орнітофауни та кажанів повністю компенсуються сучасними інженерними системами: пасивним контрастним

фарбуванням, інтелектуальними ШІ-радарами зупинки турбін IdentiFlight та динамічним алгоритмічним призупиненням обертання у періоди нічної активності кажанів.

Головна екологічна проблема галузі – накопичення відпрацьованих композитних лопатей – на сучасному етапі успішно вирішується за рахунок технологій цементного ко-процесингу, піролізного відновлення високоякісних вуглеволокон та впровадження інноваційних хімічно розчинних епоксидних матриць, що повністю закриває цикл кругової економіки відновлюваної енергетики.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та розв’язання актуального науково-практичного завдання щодо підвищення ефективності функціонування вітроелектричних установок в умовах континентальних регіонів із помірним вітропотенціалом. Комплексна оптимізація аеродинамічних, механічних та електричних параметрів дозволила обґрунтувати технічні рішення для максимізації вироблення електроенергії за низьких швидкостей повітряних потоків.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проаналізовано специфіку та виклики роботи ВЕУ в умовах помірних вітрових потоків (v_{avg} = 4,0…6,5 м/с). Доведено, що через кубічну залежність потужності від швидкості вітру падіння швидкості вдвічі зменшує енергетичний потенціал потоку на 87,5%. Визначено, що висока шорсткість континентального рельєфу формує значний вертикальний градієнт швидкості вітру та підвищену мікротурбулентність у приземному шарі. Це обґрунтовує необхідність збільшення висоти веж для виходу в ламінарні шари атмосфери та розробки систем, стійких до асиметричних навантажень і частих зривів аеродинамічного потоку.

2. Здійснено аеродинамічну оптимізацію ротора вітротурбіни для зони низьких чисел Рейнольдса ($Re < 5 \cdot 10^5$). Обґрунтовано доцільність застосування спеціалізованих аеродинамічних профілів (серій NREL та DU) з підвищеною увігнутістю задньої кромки, що мінімізує утворення ламінарних бульбашок відриву. Завдяки зниженню розрахункової швидкохідності до значень $\lambda_{opt} = 5{,}5…7$, оптимізовано геометрію хорди лопаті, що суттєво збільшило її площу в прикореневій зоні. У поєднанні з агресивним законом геометричної крутки це забезпечило високий пусковий крутний момент та стабільне утримання оптимального кута атаки. Додаткове впровадження пасивних елементів (генераторів вихорів та кінцевих шайб) дозволило мінімізувати індуктивні втрати й підвищити інтегральний коефіцієнт потужності C_p.

3. Обґрунтовано ефективність впровадження механічної концепції «Low Specific Power» (LSP) для низькошвидкісних регіонів. Доведено, що штучне збільшення діаметра ротора відносно номінальної потужності генератора (зниження питомої потужності до 180…250 Вт/м^2) зміщує криву генерації ліворуч, забезпечуючи вихід ВЕУ на номінальну потужність вже при швидкостях вітру 7,5…8,5 м/с. Завдяки заміні класичного мультиплікатора безредукторним приводом на основі багатополюсного синхронного генератора на постійних магнітах (PMSG Direct Drive) повністю ліквідовано втрати на в'язке тертя оливи, що знизило поріг запуску до 1,5…1,8 м/с.

4. Розв’язано задачу структурної міцності та динамічної стабілізації високоінерційних систем. Застосування пултрузійних профілів із

вуглепластику в силовому каркасі лопатей дозволило знизити їхню масу на 25-30% та реалізувати аеропружний ефект пасивного зв'язку згину й кручення для демпфування поривів вітру. Розраховано параметри високих гібридних веж у межах концепції Soft-Stiff для уникнення резонансних частот 1P та 3P. Доведено ефективність використання керованих масових демпферів (TMD) у гондолі та інтегрованих дворядних конічних підшипників для захисту міліметрового магнітного зазору генератора від паразитних згинальних моментів.

5. Розроблено та оптимізовано алгоритми електричного керування для максимізації ККД в режимах часткових навантажень. На основі повномасштабної конверторної архітектури (Back-to-Back Converter) реалізовано цифрові алгоритми пошуку точки максимальної потужності – оптимального моменту (ОТС) та пошуку з обуренням, що гарантують динамічний трекінг екстремуму $C_{p,max}$. Впроваджено стратегії векторного керування струмом статора MTPA (максимальний момент на ампер) та ME (максимальний ККД), які оптимізують магнітний потік у генераторі й мінімізують сумарні теплові та магнітні втрати при слабкому вітрі. Додатковий перехід на силову електроніку з широкою забороненою зоною на базі карбіду кремнію (SiC) знизив втрати на перемикання інвертора на 30-50%.

6. Економічний ефект та практична цінність. Комплексна оптимізація параметрів вітрогенератора, запропонована у роботі, дозволяє підвищити коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП) ВЕУ в умовах помірних вітрів з базових 18-22% до промислово рентабельних 35-45%.

Результати дослідження можуть бути використані проектними організаціями при розробці та локалізації вітроенергетичного обладнання для децентралізованих систем енергопостачання континентальних регіонів України.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Астащенко І.П. Вітроелектрична установка для забезпечення часткових електричних потреб складського приміщення підприємства. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 2020. 54 с. https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e8e46e0a-65e1-43e4-80da-0602b5972cdf/content.

2. Бедрій Д., Семко І., Ткаченко В. Особливості управління проєктами енергозбереження в умовах переходу до циркулярної економіки. Управління розвитком складних систем. 2021. №47. С. 6-13. https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.47.6-13.

3. Білевич В.Р. Енергоефективність використання дволопатевої вітрової турбіни. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. 2025. 84 с. https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/50417/1/Білевич%20В.Р._кваліфікаційна%20робота%20магістра.pdf.

4. Бота О. Вітрові електростанції: переваги і недоліки використання. ECO-CLUSTER. 2024. https://eco-cluster.org/2024/11/13/vitrovi-elektrostantsii-perevahy-i-nedoliky-vykorystannia/.

5. Буняк О.А. Особливості вітрових турбін та їх типи. Матеріали V Міжнародної студентської науково-технічної конференції «Природничі та гуманітарні науки. актуальні питання». 2022. https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/37988/2/V_MSNTK_2022_Mykolyshyn_V-Specifics_of_wind_turbines_43-44.pdf.

6. Гарасимчук І.Д., Потапський П.В., Вусатий М.В., Печенюк А.В. Проблеми побудови ефективної системи управління безпекою праці в електроустановках сучасного підприємства. Публічне управління і політика. 2025. №7-8(11-12). DOI: 10.70651/3041-2498/2025.7-8.12. https://www.eu-scientists.com/index.php/pmap/article/view/347/336.

7. Гарасимчук І.Д., Панцир Ю.І., Оленюк О.А., Печенюк А.В. Сучасні виклики та перспективи підвищення енергоефективності будівель і споруд в Україні. Подільський вісник: сільське господарство, тех-ніка, економіка. 2025. №1(46). С. 228-235. DOI: https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-1.33.

8. Данькевич Н.С., Михайленко О.В. Планування виробничо-господарської діяльності на підприємствах сільськогосподарської промисловості. Економіка і суспільство. 2018. №16. С. 894-900. https://economyandsociety.in.ua/journals/16_ukr/136.pdf.

9. Дубінін М. Принцип роботи сучасного вітрогенератора: компоненти та особливості функціонування. ECO-VOLT. 2024. https://eco-volt.com.ua/blog/pryntsyp-roboty-suchasnoho-vitroheneratora-komponenty-ta-osoblyvosti-funktsionuvannya.

10. Дурас М.В. Огляд конструкції вітрових турбін та вітрогенераторів. 2022. http://repozitory.zhatk.zt.ua/bitstream/123456789/781/1/EUROPEAN-CONGRESS-OF-SCIENTIFIC-ACHIEVEMENTS-7-9.10.24-101-106.pdf.

11. Конеченков А. За два роки війни введено близько 230 МВт вітрогенерації. Українська енергетика. 2023. https://ua-energy.org/uk/posts/andrii-konechenkov-za-dva-roky-viiny-vvedeno-blyzko-230-mvt-vitroheneratsii.

12. Мартиненко І.І., Лисенко В.П., Тищенко Л.П., Болбот І.М., Олійник П.В. Проектування систем електрифікації та автоматизації АПК. Київ, 2008. – 330 с. URL: https://www.tsatu.edu.ua/ettp/wp-content/uploads/sites/25/17-proektuvannja-system-elektryfikaciyi-ta-avtomatyzaciyi-apk-1.pdf.

13. Олійник Ю.С., Лазарчук Л.М., Сук І.В. Нові тенденції в енергетиці. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. 2021. №2. С. 74-78. https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/2_2021/part_2/14.pdf.

14. Печенюк А.В. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Проєктування енергетичних об’єктів сільського господарства» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2025. 26 с. (1,1 ум. д.а.).

15. Печенюк А.В., Печенюк В.А. Перспективи застосування штучного інтелекту для покращення енергозбереження в умовах України. Інноваційна економіка. 2024. №2(98). С. 46-52. DOI: 10.37332/2309-1533.2024.2.6. http://inneco.org/index.php/innecoua/article/view/1246.

16. Печенюк А.В. Проєктування енергетичних об'єктів аграрного підприємства. Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: [Електронний ресурс]: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 6 листопада

2024 р. / Держ. біотехнологічний ун-т. – Харків, 2024. – С. 38-39. URL: http://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi/.

17. Півняк Г., Шкрабець Ф., Нойбергер Н., Ципленков Д. Основи вітроенергетики. Нац. гірн. ун-т, 2015. 335 с. https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/OB-2015-02-11.pdf.

18. Повханич А.Ю. Вітроенергетика як ключовий елемент енергетичної стратегії. Науковий вісник Ужгородського національного університету. 2022. №13. С. 81-86. https://dspace.uzhnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/3c26cbd6-5ae4-4f90-bad6-1e46a8b92560/content.

19. Потапський П.В.. Вусатий М.В., Вільчинська Д.В., Печенюк А.В. Сучасні підходи до проектування енергетичних систем аграрної сфери. Філософія та управління. 2025. №5(9). DOI:10.70651/3041-248X/2025.5.10. https://www.eu-scientists.com/index.php/fag/article/view/254/243.

20. Рубаненко О.О. Основи проектування енергетичних об’єктів в АПК. – Вінниця: Видавничий центр ВНАУ, 2017 р. – 94 с. URL: http://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/14871.pdf.

21. Савойський О.Ю., Чепіжний А.В., Вольвач Т.С., Лисенко В.В. Основи проєктування енергетичних об’єктів АПВ. Суми, 2025. 69 с. https://itf.snau.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/24_14.pdf.

22. Салашний В.М. Проектування вітрогенераторної установки для Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». 2025. 89 с.

https://reposit.nupp.edu.ua/files/original/107/18402/4796a3ca8becff05d0a1df1e992e8fc209cbb22e.pdf.

23. Семко І.Б., Строкань Д.В. (2023). Необхідність проєктного підходу у відновлювальній енергетиці. Управління розвитком складних систем. 2023. №55. С. 83-91. URL: https://mdcs.knuba.edu.ua/article/view/291138.

24. Степанчиков Д.М., Дон Н.Л. Застосування принципу максимуму ентропії у вітроенергетиці. Вісник ХНТУ. 2025. №3(94). С. 274-281. https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/article/view/1134/1090.

25. Суходоля О.М. Штучний інтелект в енергетиці: аналіт. доповідь. Київ: НІСД, 2022. – 49 с. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2022-07/dopovid-ai-v-energetici-red_01-pogodzheno-sukhodolya_02-1.pdf.

26. Тарасенко М., Козак К., Омеіза Л., Зінь М. Аналіз ефективності використання типових та нетипових вітроенергетичних установок. Вісник Хмельницького національного університету. 2023. №2. С. 391-400. https://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2023/06/vknu-ts-2023-n2319-391-400.pdf.

27. Шамес О.Г. Технічні характеристики ВЕУ та новий погляд на відновлювану енергетику. Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна. 2019. 68 с. http://physics-energy.karazin.ua/resources/3cd02677b6c085d226e58607eb61132f.pdf.

28. Шумейко М.С. Модернізація вітрової електричної станції шляхом використання обладнання для мінімізації енергетичних втрат. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 2025. 94 с.

https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/5d104c8f-7c4b-48ec-876d-d62092088965/content.