

## АНАЛІЗ ПЕРЕВАГ І НЕДОЛІКІВ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЬОВИХ ВІТРОУСТАНОВОК

© Корендій В.М., Зінько Р.В., 2012

**Проаналізовано характерні відмінності між горизонтально- і вертикально-осьовими вітроустановками за різними критеріями, вказано на переваги і недоліки кожної конструкції та обґрунтовано доцільність їх розвитку і використання для зростання енергетичної незалежності нашої країни.**

**Typical differences between horizontal and vertical axis wind turbines are analyzed after various eligibility criteria; the advantages and faults of each construction are indicated; the expediency of their development and exploitation in order to increase energy independence of our country are substantiated.**

**Постановка проблеми.** Сучасні вітроустановки за типом вітроколеса поділяються на два класи: горизонтально- і вертикально-осьові, які відрізняються не тільки загальною компоновальною схемою, конструкцією і основними характеристиками усіх вузлів і систем, але й способами керування і регулювання. Сьогодні у світі кількість горизонтально-осьових лопатевих вітроенергетичних установок (ГВЕУ), які використовують ефект аеродинамічної підйомної сили, становить близько 90 %, а їх серійним виготовленням займаються кілька тисяч компаній [1]. Відставання у розвитку вертикально-осьових ВЕУ (ВВЕУ) викликано кількома причинами. По-перше, вони були винайдені значно пізніше, ніж горизонтально-осьові установки (ротор Савоніуса – у 1929 р., ротор Дар'є – у 1931 р., ротор Масгроува – у 1975 р.). По-друге, до недавнього часу помилково вважалося, що їх швидкохідність не може перевищувати одиниці (для ГВЕУ вона може досягати 14 модулів) [2]. Така думка, що справджується лише для тихохідних роторів типу Савоніуса, які використовують різні опори під час руху за вітром та проти вітру, призвела до того, що ВВЕУ майже 40 років зовсім не розроблялися. І тільки у 60–70-х роках минулого століття було експериментально доведено, що у роторів типу ротора Дар'є, які використовують ефект Кацмайра [2], швидкохідність може перевищувати 6 модулів, а коефіцієнт використання енергії вітру не є значно нижчим, ніж у ГВЕУ [1]. Зважаючи на тривалий час розвитку і вдосконалення, актуальним є питання аналізу й порівняння експлуатаційних і силових параметрів обох типів вітроустановок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Порівняння горизонтально- і вертикально-осьових ВЕУ, які зустрічаються в сучасних інформаційних джерелах [1–8], переважно обмежуються згадкою про переваги використання ВВЕУ у зв'язку з їх основною властивістю – нечутливістю до напрямку вітру і, як наслідок, можливістю значного спрощення конструкції установки. Однак досвід проектування та експлуатації вітроустановок показує, що ця перевага – не єдиний параметр порівняльної оцінки цих типів ВЕУ. Вертикально- та горизонтально-осьові ВЕУ – принципово різні системи, багато характеристик яких вагомо відрізняються.

**Формулювання мети дослідження.** Проаналізувати відмінності, переваги та недоліки горизонтально- та вертикально-осьових вітроустановок за такими критеріями: 1) залежність ефективності ВЕУ від напрямку вітру; 2) коефіцієнт використання енергії вітру; 3) запуск ВЕУ; 4) раціональність силових схем ВЕУ; 5) конструкція лопаті; 6) поворот лопатей; 7) енергія потоку повітря, яка відбирається з одиниці довжини лопаті; 8) ступінь швидкохідності; 9) розміщення генератора і мультиплікатора; 10) надійність; 11) номінальна потужність; 12) розрахункова швидкість вітру; 13) питання екології; 14) масові характеристики.

### **Викладення основного матеріалу дослідження**

**Залежність ефективності ВЕУ від напрямку вітру.** Найбільша ефективність ГВЕУ досягається тільки за умови забезпечення постійної паралельності осі вітроколеса (ВК) та напрямку вітру. Необхідність орієнтації за напрямком повітряних потоків потребує наявності спеціальних механізмів та систем, які ускладнюють конструкцію та знижують її надійність (до 13 % від загальної кількості відмов припадають саме на ці системи) [1]. Крім того, фактично неможливо ефективно орієнтувати вітроколесо за зміни напрямку вітру через запізнювання (інерційність) механізмів орієнтації та нерівномірний розподіл швидкості вітрового потоку по площині вітроколеса. До конструктивних недоліків необхідно зарахувати те, що система орієнтації розриває жорсткий зв'язок між гондолою та опорною баштою, що зумовлює появу автоколиваний, розбіжності у частотних характеристиках рухомої й нерухомої частин конструкції та знижує надійність установки. Ефективність роботи ВВЕУ принципово не залежить від напрямку вітру, у зв'язку з чим немає необхідності в механізмах та системах орієнтації [3, 5].

**Коефіцієнт використання енергії вітру.** Теоретично доведено, що коефіцієнт використання енергії вітру ідеального вітроколеса горизонтально- і вертикально-осьової установки однаковий і дорівнює 0,593 [1]. Це пояснюється тим, що ротор ГВЕУ використовує ефект підйомної сили, який виникає під час обтікання вітровим потоком лопаті з аеродинамічним профілем. При цьому утворюється аеродинамічна сила, складова якої є тяговим зусиллям, що обертає лопать навколо осі вітроколеса. Принцип дії ротора Дар'є ґрунтується на ефекті Кацмайра, з якого випливає, що за зміни напрямку повітряного потоку, який діє на двовипуклий профіль лопаті, на останньому утворюється аеродинамічне тягове зусилля, завжди напрямлене в один бік. Сьогодні досягнутий для ГВЕУ коефіцієнт використання енергії вітру становить близько 0,45-0,5, тоді як для ВВЕУ він тільки наближається до 0,45 [2].

**Запуск ВЕУ.** Вважається, що рушійний момент ГВЕУ не дорівнює нулю, тому для їх запуску навіть за швидкості вітру 2–3 м/с не потрібні зовнішні джерела енергії. Проте вітроколесо такого типу запускається лише у тому випадку, якщо воно з певною точністю направлене за напрямком вітру, для чого застосовують хвостові стабілізатори, механізми самоорієнтації, віндрузи тощо [4]. За бокового вітру вітроколесо великого діаметра може не запуститися самостійно, тому необхідні зовнішні джерела енергії та спеціальні приводи (електричні, гідравлічні, пневматичні) для повороту гондоли та надання обертового моменту ВК. Ротор Дар'є має незначний рушійний момент, тому за підключеного навантаження його самозапуск фактично неможливий [2]. Тим не менше майже усі ВЕУ великих розмірів для гарантованого старту переважно обладнують додатковими механізмами запуску (турбінами типу Савоніуса, системами короткочасного перемикання генератора у режим двигуна тощо).

**Раціональність силової схеми ВЕУ.** Динаміка вітроколес включає два основні питання: втомна міцність лопатей та розмежування між частотами збурювальних сил і власними частотами коливань елементів конструкції з метою уникнення явища резонансу. Кількість циклів навантажень для обох типів ВЕУ приблизно однакова і за 30 років експлуатації становить понад  $10^9$  циклів (за частоти обертання вітроколеса 100 об/хв) [7].

Аеродинамічні навантаження на лопаті ВВЕУ мають циклічний характер і доволі вагомо впливають на втомну міцність як самих лопатей, так і інших елементів вітроколеса та його опорного вузла. Ці сили спричиняють необхідність збільшення хорди та несучої здатності лопаті. Інерційні навантаження на лопать ГВЕУ напрямлені за її довжиною, тобто найвигідніше. Маточина колеса та елементи опорно-підшипникового вузла компактні й малогабаритні. Що ж стосується ВВЕУ, то інерційні навантаження напрямлені впоперек лопаті вздовж траверси і мають значимий характер (частка постійної відцентрової сили становить близько 60 %). Для розвантаження лопатей застосовують подвійні траверси або тросові розтяжки. Маточина та опорно-підшипниковий вузол мають великі габарити, в результаті чого ВВЕУ є дещо важчою, ніж горизонтально-осьова установка аналогічної потужності [2]. Проте для ГВЕУ мегаватного класу аеродинамічні навантаження на лопать неоднакові через різницю швидкостей вітру за її довжиною. Лопать працює з різними швидкостями та передає пульсуючий крутний момент на маточину.

Також доволі вагомий вплив на динаміку установки чинять гравітаційні навантаження і коріолісові сили інерції за повороту такої турбіни за напрямком вітру. Пульсуючі аеродинамічні та гравітаційні навантаження істотно знижують вібростійкість лопаті, маточини та опорно-підшипникового вузла, спричиняючи пришвидшене зношення і вихід з ладу установки [1].

**Конструкція лопаті.** Усі перерізи лопаті ГВЕУ знаходяться у різних енергетичних станах внаслідок нерівномірності розподілу колових швидкостей і кутів атаки за їх довжиною. Ці відмінності спричинені закручуванням одного перерізу лопаті стосовно іншого. Особливості інерційного навантаження на лопаті приводять до необхідності звуження їх профілю від внутрішнього до зовнішнього радіуса. Отже, оптимальна лопать ГВЕУ має доволі складну геометрію: поздовжню гвинтову закрутку, змінну хорду профілю за довжиною, обтічні торці тощо [5]. Лопать ГВЕУ конструктивно є складнішою, ніж прямокутна, симетрична стосовно хордової площини лопать ВВЕУ. З іншого боку, збирання склопластикової лопаті ВВЕУ із окремих секцій є доволі складним процесом, оскільки необхідно використовувати фланцеві стики. Так чи інакше, в обох схемах ВЕУ лопаті повинні задовольняти такі вимоги: високу міцність на розтяг і згинання, невелику масу, здатність працювати у широкому діапазоні температур, стійкість до обмерзання, точність форми профілю, низьку шорсткість поверхні тощо [2].

**Поворот лопатей.** Поворот лопатей ГВЕУ використовується не тільки як засіб гальмування вітроколеса, але й як засіб пошуку оптимального кута встановлення лопатей з метою стабілізації частоти обертання вітроколеса та максимізації відбору потужності з потоків повітря. Застосування системи повороту лопатей значно ускладнює конструкцію ГВЕУ, оскільки при цьому потрібна і система неперервного контролю за частотою обертання, і поворотні механізми з приводами до кожної лопаті, і система автоматичного управління кутами повороту лопатей тощо [1]. Поворот лопатей ВВЕУ був би доволі ефективним не тільки для гальмування, але й для підтримання оптимального кута атаки за усіх положень лопаті на колі обертання. Проте установки з таким принципом роботи сьогодні не застосовуються через один вагомий недолік: масивна лопать за час одного оберту навколо осі повинна зробити кілька поворотів для орієнтації на напрям вітру. При цьому слід враховувати проблематичність створення самих систем і пристроїв для таких поворотів, виникнення залежності установки від напрямку вітру, ускладнення її конструкції [3]. Тому регулювання кутової швидкості обертання вертикально-осьового вітроколеса здійснюють або додатковим електричним навантаженням на валу генератора (електродинамічним гальмом), або за допомогою аеродинамічних закріпків, розміщених переважно на елементах, що утримують лопаті у робочому стані (траверсах) [7].

**Енергія потоку повітря, яка відбирається з одиниці довжини лопаті.** Поверхня, яку охоплює вітроколесо ГВЕУ, визначається площею круга, який утворюється кінцями лопатей, що обертаються. Для ВВЕУ така поверхня визначається як площа прямокутника зі сторонами, що дорівнюють довжині лопаті та діаметру турбіни. Отже, поверхня, яку охоплює ВВЕУ, утворюється вигіднішим способом, оскільки прямокутна поверхня може змінюватися не тільки за рахунок зміни довжини лопатей, але й за рахунок діаметра їх обертання, що розширює можливості зміни параметрів ВЕУ під час її проектування та експлуатації [1]. Енергія повітряного потоку, яка відбирається з одиниці довжини лопаті ГВЕУ, незважаючи на закручування лопаті, значно змінюється від місця закріплення до зовнішнього краю лопаті через збільшення швидкохідності. У ВВЕУ значення цієї енергії також дещо змінюється за довжиною лопаті, однак ця зміна залежить тільки від якості енергії вітрового потоку: наявності поривів вітру, нерівномірності швидкості вітру за висотою. Проте у ВВЕУ є й інші причини втрат енергії, яка відбирається з потоку повітря [1]: неоптимальні кути атаки в різних положеннях лопаті на колі обертання, зменшення обертових моментів у положеннях, коли лопать рухається вздовж потоку повітря або коли проходить «аеродинамічну тінь» башти. Ще одним джерелом втрат енергії у ВВЕУ є горизонтальні або нахилені траверси, на яких встановлюються лопаті. Коефіцієнт лобового тиску, наприклад циліндричної траверси, – 0,35–0,45 [7]. Отже потрібно констатувати, що ефективність відбору енергії вітру лопатями установок обох типів є приблизно однакова.

**Ступінь швидкохідності.** Серед ГВЕУ найбільше розповсюдження отримали швидкохідні (до 6–10 модулів) установки з двома або трьома лопатями [2]. Вони забезпечують найвищий коефіцієнт використання енергії вітру, тобто є найефективніші. Вибір кількості лопатей доволі важливий, оскільки їх вартість досягає 30–40 % від вартості усєї установки [4]. Високий ступінь швидкохідності передбачає використання спеціальних пристроїв та систем для утримання кутової швидкості обертання у певних межах, що дуже ускладнює конструкцію установки. Стабільність доволі високої частоти обертання зумовлює спрощення трансмісійних зв'язків вітроколеса з генератором та доволі високу якість електроенергії без ускладнення перетворювальних електричних схем. Водночас максимальна кутова швидкість обертання ВК обмежується за критеріями міцності лопатей у зв'язку із зростанням інерційних навантажень. При цьому оптимальний режим роботи ГВЕУ забезпечується тільки за досягнення оптимальної швидкості та інтенсивності вітрового потоку, що значно знижує ефективність її використання за сильніших вітрів. Зі збільшенням діаметра вітроколеса ГВЕУ зростає вплив нерівномірності розподілу швидкості вітру за довжиною лопаті та дія інерційних сил, які викликають пульсуючі навантаження у матеріалі лопаті, опорних пристроях і трансмісіях. Ці впливи тим відчутніші, чим більша швидкохідність ВК. Тому виникає необхідність у постійному аналізі динамічної стійкості роботи усіх елементів, які обертаються, підвищенні вимог до міцності конструкції, точності її виготовлення, якості збирання, змащування і балансування. Враховуючи усі негативні чинники під час використання швидкохідних ГВЕУ, важко переоцінити вертикально-осьову конструкцію, яка забезпечує тихохідну роботу вітроколеса. В усіх відомих експериментальних дослідженнях швидкохідність ВВЕУ не перевищувала 3,5 модулів, що спричиняло незначну кутову швидкість обертання ВК [1]. Тому для використання у складі ВВЕУ швидкохідних низькомоментних навантажень (електрогенератор, осьові та відцентрові компресори тощо) необхідною умовою є застосування мультиплікатора із значним передавальним відношенням, що знижує ККД установки, підвищує її питому матеріаломісткість та вартість виробленої енергії [2]. Також необхідно відзначити, що у тихохідних ВВЕУ виникають значно більші крутні моменти. Це призводить до підвищення матеріаломісткості лопатей за рахунок довгих траверс, габаритної маточини та масивних трансмісій. Під час експлуатації вертикально-осьових установок необхідно враховувати нестабільність частоти обертання ВК, що вимагає уведення в електричну схему спеціальних перетворювачів з метою покращення якості електроенергії. Конструктивно ВВЕУ може бути і швидкохідною, проте обмеженням у цьому випадку буде міцність лопатей за дії у їх поперечному перерізі інерційних навантажень [3].

**Розміщення генератора і мультиплікатора.** Великою перевагою ВВЕУ є можливість розміщення генератора і мультиплікатора на фундаменті установки, що дає змогу відмовитися від потужної, переважно багатопотокової, кутової передачі крутного моменту [1]. За розміщення обладнання на фундаменті значно покращуються умови його монтажу та експлуатації, спрощується передавання електроенергії тощо. Верхній кінець вала вітроколеса ВВЕУ переважно фіксується розтяжками. Тому одним із недоліків ротора такого типу є велика площа відчужуваних земель через значний виліт розтяжок до фундаментних кріплень [2]. У деяких конструкціях ГВЕУ вводять кутову передачу і передають крутний момент на рівень фундаменту за допомогою довгого трансмісійного вала, що зумовлює ускладнення конструкції, проте дає змогу ефективно розмістити обладнання [1]. Все ж здебільшого обладнання ГВЕУ встановлюють у гондолі, яка обертається за орієнтації вітроколеса за напрямком повітряного потоку. При цьому виникають ускладнення у зв'язку з підвищенням вимог до умов його експлуатації, організацією його підйому й обслуговування, а також передачі електроенергії від генератора, який обертається разом із гондолою, до перетворювальних пристроїв, що знаходяться на рівні фундаменту [5]. В усіх цих випадках у конструкцію ВЕУ вводяться додаткові пристрої, ускладнюючи її.

**Надійність.** Сьогодні вважається, що надійність експлуатації ГВЕУ значно вища, ніж ВВЕУ. Це пояснюється тим, що у ГВЕУ вдало поєднуються досягнення авіаційної галузі, зокрема в галузі

проектування лопатей і трансмісії, систем управління кутами встановлення лопатей тощо [4]. Проте за оцінками експертів, у перспективі ВВЕУ досягнуть того самого рівня надійності завдяки своїм конструктивним особливостям: відсутність механізмів і систем повороту гондоли за напрямком вітру та управління кутом встановлення лопатей; розміщення генератора і мультиплікатора на фундаменті; зниження вимог до виготовлення та монтаж трансмісії; відсутність проблем під час передавання електроенергії від генератора тощо.

**Номінальна потужність.** Збільшення габаритів ГВЕУ ефективно лише до межі досягнення нею потужності у 3–4 МВт (за діаметра вітроколеса до 120 м) [2]. Це пояснюється тим, що на її лопаті, окрім відцентрових сил, діють згинальні моменти, спричинені гравітаційними та коріолісовими навантаженнями. Вони характеризуються часовою мінливістю, величиною і напрямком, що обмежує розміри лопатей, істотно знижує надійність ГВЕУ та скорочує терміни їх експлуатації. За необхідності в отриманні більшої кількості енергії з однієї установки краще використовувати вертикально-осьову схему, теоретична межа потужності якої на порядок вища. Однак, як свідчить світова практика будівництва вітроенергетичних станцій, оптимальнішим вирішенням цього питання є розміщення на певній території кількох установок, які працюватимуть в єдиній мережі, ніж будівництво однієї ВЕУ значно більших розмірів.

**Розрахункова швидкість вітру.** Розрахункова швидкість вітру для ГВЕУ переважно знаходиться у межах 12–15 м/с за умови міцності лопатей на інерційні навантаження [1]. Проте для деяких районів із великим вітровим потенціалом такі значення інколи є недостатніми, оскільки при цьому виявляються недовикористаними надто великі вітроенергетичні ресурси. Робочий діапазон швидкостей вітру для тихохідних ВВЕУ може підвищуватися до 20–25 м/с, що надає перевагу в їх використанні у районах із високими середньорічними швидкостями вітру [3, 5].

**Питання екології.** Тихохідні ВВЕУ з точки зору впливу на довкілля мають беззаперечні переваги перед швидкохідними ГВЕУ: при їх роботі нижчі рівні аеродинамічних та інфразвукових шумів, вібрацій, слабші перешкоди телевізійним та радіосигналам, менший радіус розкидання уламків лопатей під час їх поламки, нижча ймовірність зіткнення лопатей із птахами [3, 5].

**Масові характеристики.** Маса горизонтально-осьових вітроколес складається із маси лопатей і маточини. Лопаті своєю торцевою частиною безпосередньо приєднуються до маточини, яка разом із опорно-підшипниковим вузлом доволі компактна і малогабаритна за рахунок того, що інерційні навантаження напрямлені вздовж лопатей. Маса класичного ротора Дар'є складається із мас лопатей, верхнього і нижнього опорно-підшипникових вузлів, центральної трубчастої стійки і розпірок. При цьому його маса буде у 3–5 разів перевищувати масу аналогічного за потужністю вітроколеса ГВЕУ. Лопаті Н-ротора Дар'є віддалені від осі обертання і встановлені у вертикальному робочому положенні за допомогою горизонтальних або нахилених траверс. Наявність додаткових елементів кріплення лопатей підвищує масу вітроколеса. Отже, його маса перевищує масу аналогічного за потужністю вітроколеса ГВЕУ приблизно у 1,5–3 рази.

**Висновки.** Ще 10–15 років тому ВВЕУ становили лише 10 % від загальної кількості вітроустановок, що експлуатувалися у світі [8]. Проте з кожним роком їх розвиток ставав все динамічнішим і вже сьогодні співвідношення між горизонтально- і вертикально-осьовими установками малої потужності (до 30 кВт) становить 65:35 %. І за прогнозами експертів, ці дані змінюватимуться у подальшому не на користь ГВЕУ. Все ж варто відмітити їх переваги.

Швидкохідні ГВЕУ мають такі переваги: 1) високий коефіцієнт використання енергії вітру; 2) велике значення номінальної швидкохідності (6–10 модулів), що дає змогу уникнути застосування громіздких мультиплікаторів; 3) хороші техніко-економічні показники: питома вартість встановленої потужності приблизно становить 800–1000 дол./кВт, питома металомісткість досягає 150 кг/кВт; 4) мала кількість лопатей, низька парусність і підвищена стійкість вітроколеса за сильних поривів вітру; 5) відсутність різкого піка на кривій залежності коефіцієнта використання

енергії вітру від швидкохідності установки, що дає змогу ефективно працювати у широкому діапазоні зміни швидкохідностей; 6) доцільність використання механізмів та систем керування поворотом лопатей з метою керування частотою обертання вітроколеса.

Проте і ВВЕУ мають деякі ключові переваги: 1) можливість обертання без залежності від напрямку вітру; 2) потужність установки обмежується тільки висотою щогли і потужністю інвертора; 3) набагато нижчий шумовий фон (до 20–50 дБ), магнітне випромінювання і вібрації; 4) менша небезпека для птахів, бджіл та доквілля; 5) висока стійкість до сильних поривів вітру; 6) легка і проста конструкція для транспортування та спорудження; 7) використання у ширшому діапазоні швидкостей вітру (2–50 м/с); 8) порівняно невелика швидкість обертання ротора збільшує ресурс роботи окремих елементів установки тощо.

У складному сполученні властивостей, які найчастіше двоїсто характеризують кожен із типів ВЕУ, неможливо однозначно користуватися методами їх якісної оцінки (легше-важче, складніше-простіше, ефективно-неефективно). Необхідний кількісний аналіз усього комплексу характеристик ВЕУ на основі теоретичних та модельно-експериментальних досліджень з метою отримання даних про ефективність використання вітроустановок обох типів в економічних та метеорологічних умовах конкретного регіону. Якщо міркувати в загальному плані, то необхідно підкреслити, що однією схемою, як і одним типорозміром ВЕУ, неможливо задовольнити потреби всіх споживачів навіть однієї країни. Вітроенергетика як підгалузь енергетики стане конкурентоспроможною тільки за умови розвитку різних напрямків, які здатні створити державний ринок вітроенергетичної техніки.

1. <http://wind.atmosfera.ua>: Потребление энергии от ветровых установок. 2. <http://ecozone.crimea.ua>: Разнообразие ВЭУ. 3. <http://teplotlen.com>: Вертикальный ветрогенератор, ветровые энергоустановки (ВЭУ). 4. Кузьо І.В. Обґрунтування розвитку вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності / І.В. Кузьо, В.М. Корендій // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2010. – № 679. – С. 61–68. 5. <http://dizelek.com.ua>: Основные преимущества вертикальных ветрогенераторов. 6. Корендій В.М. Порівняльний аналіз горизонтально- і вертикально-осьових вітроустановок / В.М. Корендій // Інженерна механіка та транспорт 2011: 2-га Міжнарод. наук. конф. студ., аспірантів та молодих вчених, 24–26 листопада 2011 р.: тези доповідей. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 46–49. 7. Johnson G.L. Wind energy systems. Manhattan: Electronic edition, 2006. – 449 p. 8. Manfred Stielbler. Wind energy systems for electric power generation. – Berlin: Springer, 2008. – 193 p.