

The Comparative Analysis of Horizontal- and Vertical-Axis Wind Turbines

Vitaliy Korendiy

Chair of Mechanics and Automation of Machine Building,
Lviv Polytechnic National University, UKRAINE, Lviv,
Profesorska Street 1, E-mail: vitaliy_korendiy@mail.ru

Nowadays in the world the amount of horizontal-axis wind-power installations (WPI), which use the effect of aerodynamic lifting load, is about 90 %, and a few thousand of companies are engaged in the batch production of them. The lag in development of vertical-axis WPI is caused by a few reasons. At first, they were invented considerably later than horizontal-axis WPI. Secondly, until quite recently it was erroneously considered that their rapidity can not exceed one module (for horizontal-axis WPI it may reach to 14 modules).

The comparison of horizontal- and vertical-axial WPI, which can be found in modern literature, usually is limited by the mention about advantages of the use of vertical-axial WPI in connection with their basic property – the insensibility to the direction of the wind and, as a result, the possibility of considerable simplification of construction of the installation. However the experience of designing and exploitation of WPI shows, that this advantage is not the only parameter of comparative assessment of these types of WPI. Vertical- and horizontal-axis WPI are fundamentally different systems, many characteristics of which do not recur. Therefore we will make an attempt to analyse differences, advantages and faults of both systems after such criteria: 1) dependence of efficiency of wind-power installation on direction of the wind; 2) coefficients of the use of the wind power; 3) starting of WPI; 4) rationality of the power chart of WPI; 5) construction of blade; 6) turn of blades; 7) energy of air flow, which is taken away by the blade; 8) degree of rapidity; 9) placing of generator and booster; 10) reliability; 11) capacity; 12) rated speed of the wind; 13) ecological aspects; 14) mass characteristics.

In complex variety of properties, which commonly ambivalently characterize each type of WPI, it is impossible to use simple methods of their quality assessment (easy-heavy, difficult-simple, effective-ineffective). The quantitative analysis of total complex of characteristics of WPI, on the basis of theoretical and model-experimental researches with the purpose of receipt of data about efficiency of the use of WPI of both types in the economic and meteorological conditions of concrete region, is necessary. In general, it is necessary to emphasize that it is impossible to satisfy the necessities of all consumers of the country. Wind power as the subindustry of power engineering will become competitive only on condition of development of different directions which are able to create the state market of wind-power technique.

Порівняльний аналіз горизонтально- і вертикально- осьових вітроустановок

Віталій Корендій

Кафедра механіки та автоматизації машинобудування,
Національний університет “Львівська політехніка”,
УКРАЇНА, м. Львів, вул. Професорська, 1,
E-mail: vitaliy_korendiy@mail.ru

Здійснена спроба проаналізувати характерні відмінності між горизонтально- і вертикально-осьовими вітроустановками, вказати на переваги і недоліки та обґрунтувати доцільність використання кожної з них для зростання енергетичної незалежності нашої країни.

Ключові слова – вітроенергетична установка, коефіцієнт використання енергії вітру, ступінь швидкохідності, система орієнтації за напрямом вітру, система повороту лопатей, теоретична межа потужності.

I. Вступ

На даний час у світі кількість горизонтально-осьових лопатевих вітроенергетичних установок (ГВЕУ), які використовують ефект аеродинамічної підйомної сили, складає близько 90 %, а їх серійним виготовленням займаються декілька тисяч компаній [1]. Відставання у розвитку вертикально-осьових ВЕУ (ВВЕУ) викликано декількома причинами. По-перше, вони були винайдені значно пізніше, ніж горизонтально-осьові установки (ротатор Савоніуса – в 1929 р., ротор Дар’є – в 1931 р., ротор Масгроува – в 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 ротора Савоніуса, які використовують різні опори при русі за вітром та проти вітру, призвела до того, що ВВЕУ майже 40 років зовсім не розроблялися. І тільки в 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].

Порівняння горизонтально- і вертикально-осьових ВЕУ, які зустрічаються в сучасній літературі, зазвичай 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 не повторюються. Тому нижче ми спробуємо проаналізувати відмінності, переваги та недоліки обох систем за такими критеріями: 1) залежність ефективності ВЕУ від напрямку вітру; 2) коефіцієнт використання енергії вітру; 3) запуск ВЕУ; 4) раціональність силової схеми 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) потужність; 12) розрахункова швидкість вітру; 13) питання екології; 14) масові характеристики.

II. Виклад основного матеріалу

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 в конструкції ВЕУ механізмів та систем орієнтації, які ускладнюють конструкцію та знижують її надійність (до 13 % загальної кількості відмов припадають на системи орієнтації) [1]. Крім цього, практично неможливо ефективно орієнтувати вітроколесо при зміні напрямку вітру через запізнювання механізмів орієнтації та розбіжності у швидкостях вітрового потоку по діаметру вітроколеса. До конструктивних недоліків слід віднести те, що система орієнтації розриває жорсткий зв'язок між гондолою та опорною баштою, що обумовлює появу автоколивань та розбіжності в частотних характеристиках рухомої та 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-осьових установок рівний 0,593 [1]. Це пояснюється тим, що ротор ГВЕУ використовує ефект підйомної сили, який виникає при обтіканні 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 Даре заснований на ефекті Кацамайра, з якого випливає, що при зміні напрямку повітряного потоку, що діє на двовипуклий профіль, на останньому утворюється аеродинамічне тягове зусилля, завжди напрямлене в одну сторону. На даний час досягнутий на ГВЕУ коефіцієнт використання енергії вітру становить близько 0,45-0,5, тоді як для ВВЕУ він наближається до 0,4 [2].

Запуск ВЕУ. Вважається, що рушійний момент ГВЕУ не дорівнює нулю, тому для їх запуску не потрібні зовнішні джерела енергії. Проте вітроколесо такого типу запускається лише в тому випадку, коли воно з певною точністю направлено на вітер [4]. При боковому вітрі вітроколесо великих розмірів може не запуститися самостійно, тому необхідне зовнішнє джерело енергії для повороту гондoli з вітроколесом за напрямком вітру. Ротор Даре володіє дуже незначним рушійним моментом, тому при підключеному навантаженні його самозапуск практично неможливий [2]. Тим не менше, майже усі ВЕУ великих розмірів для гарантованого старту зазвичай обладнують додатковими механізмами запуску (турбінами типу Савоніуса, системами короткочасного перемикання генератора у режим двигуна тощо).

Раціональність силових схем ВЕУ. Інерційні навантаження на лопать ГВЕУ напрямлені вздовж лопаті, тобто найбільш вигідним чином. Маточина колеса та елементи опорно-підшипникового вузла компактні і малогабаритні. Інерційні навантаження на лопать ВВЕУ напрямлені впоперек лопаті вздовж траверси. Маточина та опорно-підшипниковий вузол мають великі габарити, в результаті чого ВВЕУ є дещо важчою, ніж аналогічна горизонтально-осьова установка [2]. Проте для ГВЕУ мегаватного класу аеродинамічні навантаження на лопать неоднакові через різницю швидкостей вітру за її довжиною. Лопать працює з різними швидкохідностями та передає маточині пульсуючий крутний момент. Також зростає значення сил гравітації і сил Кориоліса при повороті такої турбіни за напрямком вітру. Пульсуючі аеродинамічні та гравітаційні навантаження суттєво знижують вібростійкість лопаті, маточини та опорно-підшипникового вузла [1].

Конструкція лопаті. Всі перерізи лопаті ГВЕУ знаходяться в різних енергетичних станах через відмінності їх колових швидкостей і кутів атаки. Ці відмінності значно знижуються завдяки закручуванню одного перерізу лопаті відносно іншого. Особливості інерційного навантаження лопаті призводять до необхідності звуження профілю до кінця лопаті. Отже оптимальна лопать ГВЕУ має досить складну геометрію: поздовжню гвинтову закрутку, змінну хорду профілю вздовж довжини, обтічні торці лопатей тощо [5]. Таким чином, лопать ГВЕУ конструктивно є складнішою, ніж прямокутна, симетрична відносно хордової площини лопать ВВЕУ. З іншого боку, збирання склопластикової лопаті ВВЕУ із окремих секцій є досить складним процесом, оскільки необхідно використовувати фланцеві стики. Так чи інакше, в обох схемах ВЕУ лопаті повинні задовольняти наступні вимоги: висока міцність на розтяг і згинання, невелика маса, здатність працювати в широкому діапазоні температур, стійкість до обмерзання, точність форми профілю, низька 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. 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 досить ефективним не тільки для гальмування, але і для підтримання оптимального кута атаки при всіх положеннях лопаті на колі обертання. Проте установки з таким принципом роботи на даний час не застосовуються через наступний недолік: масивна лопать за час одного оберту навколо осі повинна зробити декілька 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].

Енергія потоку повітря, яка відбирається з одиниці довжини лопаті. Поверхня, яку охоплює вітроко-

лесо ГВЕУ визначається площею круга, який утворюється кінцями лопатей, що обертаються. Для ВВЕУ така поверхня визначається як площа прямокутника зі сторонами, що рівні довжині лопаті та діаметру турбіни. Таким чином, поверхня, яку охоплює ВВЕУ, утворюється більш вигідним чином, 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 при її проектуванні та експлуатації [1]. Енергія повітряного потоку, яка відбирається з одиниць довжини лопаті ГВЕУ, незважаючи на закручування лопаті, значно змінюється від місця кріплення до зовнішнього краю лопаті головним чином внаслідок збільшення швидкохідності. У ВВЕУ значення цієї енергії також дещо змінюється за довжиною лопаті, при чому ця зміна залежить тільки від якості енергії вітрового потоку: наявності поривів вітру, нерівномірності швидкості вітру за висотою. Однак у ВВЕУ є 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. Таким чином потрібно констатувати, що ефективність відбору енергії вітру лопатями установок обох типів є приблизно однаковою.

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 найбільш ефективні. Вибір кількості лопатей досить важливий, оскільки їх вартість досягає 30-40 % від вартості всієї установки [4]. Висока ступінь швидкохідності передбачає використання спеціальних пристроїв та систем для утримання кутової швидкості обертання у певних межах, що значно ускладнює конструкцію установки. Стабільність досить високої частоти обертання обумовлює спрощення трансмісійних зв'язків вітроколеса з генератором та досить високу якість електроенергії без ускладнення перетворюючих електричних схем. Водночас стабільність частоти обертання, яка обмежується міцністю лопатей на інерційне навантаження, передбачає обмеження робочих швидкостей вітру та роботу ВЕУ в оптимальному режимі тільки при певній силі повітряних потоків, що, звичайно, знижує ефективність установки. Для ГВЕУ з вітроколесами великих діаметрів зростає вплив нерівномірності швидкості вітру за висотою та дія інерційних сил, які викликають пульсуючі навантаження у матеріалі лопаті, в опорних пристроях і трансмісіях. Ці впливи тим відчутніші, чим більша швидкохідність, що вимагає підвищеної уваги до динамічної стійкості роботи всіх елементів, які обертаються, підвищення вимог до міцності конструкції і точності її виготовлення, якості збирання, змащування і балансування. Враховуючи всі негативні фактори при використанні швидкохідних ГВЕУ, важко переоцінити вертикально-осьову схему, яка забезпечує тихохідну роботу вітроколеса. У всіх відомих експериментах швидкохідність ВВЕУ не перевищувала 2,5-2,8 модулів [1]. Проте низьке значення

швидкохідності призводить до невеликої частоти обертання ВК. Тому для використання у складі ВВЕУ швидкохідних низькоентних навантажень (електрогенератор, осьові та відцентрові компресори тощо) необхідною умовою є застосування мультиплікатора із значним передавальним відношенням, що знизить ККД установки, підвищить її питому матеріалоемність та вартість виробленої електроенергії [2]. Однак необхідно мати на увазі, що у тихохідних ВЕУ значно більші крутні моменти, що призводить до підвищення матеріалоемності лопатей за рахунок довгих траверс, габаритної маточини та масивних трансмісій. Необхідно також врахувати нестабільність частоти обертання вітроколеса, що вимагає уведення в електричну схему спеціальних перетворювачів з метою покращення якості електроенергії. Принципово ВВЕУ з прямими лопатями може бути і швидкохідною, проте обмеженням в даному випадку буде міцність лопатей на поперечні інерційні та вібраційні навантаження [3].

Розміщення генератора і мультиплікатора. Великою перевагою ВВЕУ є можливість розміщення генератора і мультиплікатора на фундаменті установки, що дозволяє відмовитися від потужної, переважно багатопотокової, кутової передачі крутного моменту [1]. При розміщенні обладнання на фундаменті значно покращуються умови його монтажу та експлуатації, спрощується передавання електроенергії тощо. Верхній кінець валу вітроколеса ВВЕУ зазвичай 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 передаються крутний момент на рівень фундаменту за допомогою довгого трансмісійного валу, що зумовлює ускладнення конструкції, проте дозволяє розмістити обладнання на фундаменті установки [1]. Все ж у більшості випадків обладнання ГВЕУ розміщують у гондолі, яка обертається. При цьому виникають ускладнення у зв'язку з підвищення вимог до умов його експлуатації, при організації його підйому та передачі електроенергії від генератора, який обертається разом із гондолою [5]. У всіх цих випадках у конструкцію ВЕУ вводяться додаткові пристрої, ускладнюючі її.

Надійність. На даний час вважається, що надійність експлуатації ГВЕУ значно вища, ніж ВВЕУ. Це пояснюється тим, що у ГВЕУ вдало використовуються досягнення авіаційної галузі, зокрема в області проектування лопатей і трансмісії, систем управління кутами встановлення лопатей тощо [4]. Проте вважається, що у перспективі з розвитком ВВЕУ досягнуть того ж рівня надійності завдяки своїм особливостям: відсутність механізмів і систем повороту гондолою за напрямком вітру та управління кутом встановлення лопатей; розміщення генератора і мультиплікатора на фундаменті; зменшення вимог до виготовлення трансмісії; відсутність проблем при передаванні електроенергії від генератора тощо.

Потужність. Збільшення габаритів ГВЕУ ефективне лише до межі досягнення нею потужності в 3-4 МВт (при діаметрі вітроколеса до 122 м) [2]. Це пояснюється

тим, що на її лопаті окрім відцентрових сил діють згинальні сили, змінні за величиною та напрямком, що обмежує розміри лопатей, суттєво знижує надійність ГВЕУ та скорочує терміни їх експлуатації. При переході на більш потужності краще використовувати вертикально-осьову схему, теоретична межа потужності якої на порядок вища.

Розрахункова швидкість вітру. Розрахункова швидкість вітру для ГВЕУ зазвичай знаходиться в межах 12-15 м/с за умови міцності лопатей на інерційне навантаження [1]. Проте для деяких районів із великим вітровим потенціалом такі значення розрахункової швидкості вітру 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 навколишнє середовище 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 при їх поломці, нижча ймовірність зіткнення лопатей із птахами тощо [3, 5].

Масові характеристики. При порівнянні приблизно однакового класу установок з горизонтальною та вертикальною віссю обертання вітроколеса, можна зробити наступні висновки: робочі органи (лопать, траверса) вітроколеса ГВЕУ легші, а маточина – важча. Система передавання моменту легша у ВВЕУ. Маси електричної системи та опорної башти установок обох типів приблизно однакові. Загальна маса установок майже однакова з невеликою перевагою ВВЕУ за рахунок відсутності гондоли, механізмів і систем орієнтації за напрямком вітру та повороту лопатей [1].

ВИСНОВОК

Швидкохідні ГВЕУ володіють наступними перевагами [2]: 1) високий коефіцієнт використання енергії вітру; 2) велике значення номінальної швидкохідності (6-10 модулів), що дозволяє уникнути застосування громіздких мультиплікаторів; 3) хороші техніко-економічні показники: питома вартість встановленої потужності приблизно складає 800-1000 дол./кВт, питома металоемність досягає 150 кг/кВт; 4) мала кількість лопатей, низька парусність і підвищена стійкість вітроколеса при сильних поривах вітру; 5) відсутність різкого піку на кривій залежності коефіцієнта викорис-

тання енергії вітру від швидкохідності установки, що дозволяє ефективно працювати в 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 [3,5]: 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 навколишнього середовища; 5) висока стійкість до сильних поривів вітру; 6) легка і проста конструкція для транспортування та спорудження; 7) використання у більш широкому 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 частіше за все двоїсто характеризують кожен із типів ВЕУ, неможливо однозначно користуватися методами їх якісної оцінки (легше-важче, складніше-простіше, ефективно-неефективно). Необхідний кількісний аналіз всього комплексу характеристик ВЕУ на основі теоретичних та модельно-експериментальних досліджень з метою отримання даних про ефективність використання вітроустановок обох типів у 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 конкурентоздатною тільки за умови розвитку різних напрямків, які здатні створити державний ринок вітроенергетичної техніки.

Література

- [1] <http://wind.atmosfera.ua>: Потребление энергии от ветровых установок.
- [2] <http://ecozone.crimea.ua>: Разнообразие ВЭУ.
- [3] <http://teploplen.com>: Вертикальный ветрогенератор, ветровые энергоустановки (ВЭУ)
- [4] Кузьо І.В., Корендій В.М. Обґрунтування розвитку вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2010. – № 679. – С. 61-68.
- [5] <http://dizelek.com.ua>: Основные преимущества вертикальных ветрогенераторов.