

## АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ВІТРОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

## АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ВЕТРОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

V.P.KOKHANIEVYCH, G.P.DUSHINA, N.V.MARCHENKO, D.S.ROMANCHENKO

## ANALYSIS OF WIND POWER PLANTS CONSTRUCTION

**Анотація.** Проведено аналіз видів конструкцій вітрових енергетичних установок та визначено чотири базові варіанти для подальшого аналізу. Запропонована методика аналізу з використанням методу парних порівнянь та визначені критерії аналізу. Проведений аналіз базових конструкцій вітроенергетичних установок показав, що найвищу інтегральну оцінку отримали горизонтально-осьові лопатеві установки.

**Ключові слова:** вітроенергетика, вітроенергетична установка, ротор, лопать, швидкість вітру.

**Аннотация.** Проведен анализ видов конструкций ветровых энергетических установок и определено четыре базовых варианта для последующего анализа. Предложена методика анализа с использованием метода парных сравнений и определены критерии анализа. Проведенный анализ базовых конструкций ветроэнергетических установок показал, что самую высокую интегральную оценку получили горизонтально-осевые лопастные ветроустановки.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, ветроэнергетическая установка, ротор, лопасть, скорость ветра.

**Abstract.** Here was analysed types of the construction for wind power plants and identified the four basic options for further analysis. Was proposed method of analysis with using the method of paired comparisons and criteria for analysis. The analysed types of wind turbines showed that the highest integrated assessment belongs to horizontal axial blade installation

**Key words:** wind power, wind power installation, rotor, blade, wind speed.

### Постановка проблеми дослідження

Динамічний розвиток світової енергетики неможливий без детального дослідження і впровадження енергетичних систем, що використовують відновлювані джерела енергії (ВДЕ). Використання ВДЕ сприяє підвищенню рівня енергетичної безпеки, зменшує кількість шкідливих викидів в атмосферу, що відповідно, сприяє покращенню соціально-побутових умов населення. До найбільш перспективних та доцільних у використанні джерел енергії відносяться енергія вітру, сонця, води та землі.

Розвиток та дослідження у галузі вітрової енергетики в Україні регламентуються відповідними законодавчими актами: Законом України «Про енергозбереження» № 30, введеним в дію Постановою ВР № 75/94-ВР від 1 липня 1994 року; Законом України «Про внесення змін до деяких законів України щодо стимулювання розвитку вітроенергетики України» № 1812-III від 8 червня 2000 року; Законом України «Про альтернативні джерела енергії» № 555-IV від 20 лютого 2003 року.

Окрім вказаних законодавчих документів дослідження у галузі відновлюваних джерел енергії підтримуються державною цільовою програмою, що затверджена Постановою Президії Національної академії наук України № 55 від 25 лютого 2009 «Основні наукові напрямки та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук на 2009-2013 роки». У програмі визначені головні напрямки наукових досліджень, пов'язані з вітроенергетикою: 1.7.1. «електромеханічне перетворення та передача енергії»; 1.7.5.2. «енергетична безпека»; 1.7.5.3. «енергетична ефективність та енергозбереження»; 1.7.11. «джерела відновлюваної енергії та її перетворення».

Для ефективного розвитку в галузі вітрової енергетики необхідно визначити базову, найбільш доцільну для дослідження, конструкцію вітрової енергетичної установки.

### Аналіз та класифікація вітрових енергетичних установок

Вітроенергетична установка (ВЕУ) – комплекс взаємопов'язаного обладнання та споруд, що призначені для перетворення енергії вітру в інші види енергії (механічну, теплову, електричну тощо).

Головним вузлом ВЕУ, який реалізує процес перетворення енергії є ротор вітроустановки. В залежності від положення робочої поверхні ротора ВЕУ по відношенню до напрямку вітрового потоку, робота може здійснюватись вітроустановкою за рахунок сили опору потоку або за рахунок підйомної сили. В залежності від схеми улаштування ротора ВЕУ та його положення в потоці вітру, існуючі системи вітрових установок розділяють на 3 основні класи [1]:

- перший клас включає вітроустановки, в яких вісь ротора розташовується у вертикальній площині, при цьому площа обертання перпендикулярна напрямку вітру, а відповідно вісь вітроколеса паралельна потоку (до цього класу належать найпоширеніші в даний час вітроустановки лопатевого типу);
- до другого класу відносяться системи вітроустановок з вертикальною віссю обертання ротора (вітроустановки системи Дар'є, системи Савоніуса та, так звані, карусельні вітрогенератори);
- до третього класу відносяться вітроустановки, які працюють за принципом водяного колеса млина і називаються барабанными (найменш розповсюджені і тому не приймають участі в порівнянні).

Для порівняльного аналізу обрано чотири базові варіанти конструктивного виконання вітрових установок.

#### **Горизонтально-осьові вітроустановки лопатевого типу:**

Обертальний момент ротора ВЕУ створюється підйомною силою, що виникає при обтіканні профілю лопаті повітряним потоком. В результаті кінетична енергія потоку в межах площі поверхні, яка обдувається, перетворюється в механічну енергію обертання ротора. Величина потужності, яка розвивається на вісі ротора, пропорційна квадрату його діаметра та кубу швидкості вітру.

Перевагами горизонтально-осьових ВЕУ є:

- можливість самостійного запуску ротора без допоміжного приводу;
- площа поверхні обмаху ротора в 2...3 рази менша ніж у ВЕУ системи Савоніуса і в ~4 рази менша ніж у карусельних [2];

До основних недоліків відносять:

- необхідність пристрою орієнтації ротора вітроустановки в напрямку вітру;
- при обертанні гондולי за напрямком вітру виникають гіроскопічні моменти в лопатях, в результаті чого навантаження на лопать та її мах можуть зростати до 50 % в залежності від системи орієнтації ротора вітроустановки.

Лопатеві вітроустановки мають найбільше розповсюдження, і їх потужність досягає 6 МВт [3].

#### **Вертикально-осьові вітроустановки з ротором Дар'є:**

У вітрових установках з ротором Дар'є лопаті утворюють просторову конструкцію, що обертається під дією підйомних сил, які, в свою чергу, виникають на лопатях під дією вітрового потоку. До переваг таких систем відносять:

- незалежність функціонування від напрямку вітрового потоку, що дозволяє уникнути використання систем орієнтації в напрямку вітру;
- наявність вертикального валу, дозволяє розміщувати електромеханічне обладнання біля основи ВЕУ;
- можливість закріплювати лопаті до ротора в декількох місцях, що знижує вимоги до міцності.

Недоліками є:

- порівнюючи з лопатевими ВЕУ у вертикально орієнтованих вітрових установках виникає необхідність початкового запуску від стороннього джерела;
- зміна напрямку дії вітрового потоку та його величини на лопаті ротора в процесі одного оберту ротора спричинює виникнення знакоперемінних навантажень, які призводять до втоми матеріалу та руйнування лопаті і її елементів кріплення.

Розробкою даних систем ВЕУ з 1970 року займається National Research Council of Canada (NRC) [4].

#### **Вертикально-осьові вітроустановки з ротором Савоніуса:**

У вітроустановках даної системи обертальний момент виникає при обтіканні ротора потоком повітря внаслідок різниці опорів опуклої та увігнутої частин ротора. Перевагою таких установок є те, що вони не потребують системи орієнтації в напрямку вітру, мають відносно невисоку пускову швидкість а також можливість динамічного балансування [5]. Недоліками даного типу конструкції є невеликий коефіцієнт використання енергії вітру до 0,18 [6], а також неможливість обмежувати швидкість обертання ротора та наявність «мертвої точки» (для дволопатевої установки) - положення, при якому пусковий момент дорівнює нулю. Така конструкція вітрогенераторів використовується для ВЕУ потужністю до 2 - 5 кВт [5].

#### **Вертикально-осьові карусельні вітроустановки:**

В установках даного типу повітряний потік, набігаючи на ротор ВЕУ, тисне на лопаті з однієї сторони вісі обертання, з другої зустрічає або ширму, або ребра лопатей, в результаті чого тиск потоку на них практично відсутній. В результаті утворюється сила в площині обертання, яка створює крутий момент на роторі.

Карусельні вітроустановки мають недоліки, характерні для усіх ВЕУ з вертикальною віссю обертання. Крім того рух поверхні ротора в напрямку вітру не дозволяє розвинути значні оберти, тому що поверхні не можуть рухатися швидше вітру. Поверхня обмаху таких установок приблизно в 4 рази більша ніж у лопатевих вітроустановок, а маса більша в 20 – 25 разів [2].

#### Невирішені питання та постановка задачі статті

Кожна з розглянутих конструкцій вітрових енергетичних установок має свої недоліки та переваги. Питання які ж вітроустановки найбільш доцільні для подальших досліджень, розробки та впровадження досі не є обґрунтованим. Тому метою даної роботи є як розробка методики так і проведення на її основі експертного порівняльного аналізу конструкцій вітроустановок методом парних порівнянь на основі наступних критеріїв: коефіцієнт використання енергії вітру, діапазон швидкохідності, розрахункова швидкість, швидкість початку генерування енергії, площа поверхні обмаху ротора, тощо.

Задачею дослідження є визначення на основі експертних оцінок та математичних розрахунків конструкцій вітрових енергетичних установок з найбільшою інтегральною оцінкою та потенціалом для наступного їх дослідження, розробки та впровадження в народне господарство.

#### Визначення критеріїв для порівняльного аналізу вітрових енергетичних установок

Для виконання порівняльного аналізу були прийняті наступні вихідні критерії:

$X_1$  – коефіцієнт використання енергії вітру. Коефіцієнт визначає, яку частину енергії вітрового потоку може перетворити вітрова установка. За класичною теорією Н.Е. Жуковського для ідеального ротора цей коефіцієнт складає  $\xi_{\text{іде}} = 0,593$  [6]. Очевидно, що цей показник у реальних вітроустановок повинен бути якомога ближчим до цього значення.

$X_2$  – швидкохідність та діапазон швидкохідності. Швидкохідність  $Z$  – відношення швидкості руху кінця лопаті до швидкості вітрового потоку. Вітроустановки працюють при швидкостях вітру, які змінюються в значних межах, а отже, чим ширший діапазон швидкохідності, тим в більших межах підтримується максимальний коефіцієнт використання енергії. Крім цього, чим вище швидкохідність, тим більші оберти ротора, що дозволяє використовувати в вітроелектричних установках мультиплікатори з меншим передаточним відношенням, а в деяких конструкціях відмовитись від них.

$X_3$  – розрахункова (номінальна) швидкість вітру. Розрахункова швидкість – швидкість вітрового потоку, при якій вітроустановка розвиває номінальну потужність. Середньорічні швидкості вітру на території України обумовлені її географічним розташуванням та рельєфом місцевості і мають середнє значення 3,5 – 5,5 м/с [7]. Очевидно, що розрахункова швидкість ВЕУ повинна бути якомога ближче до значень (1,5 – 2) середньорічної швидкості вітру.

$X_4$  – вмикальна швидкість. Вмикальна швидкість – це мінімальна швидкість вітру, при якій вітроустановка починає генерувати електричну енергію або виконувати іншу корисну роботу. Даний параметр безпосередньо впливає на ширину діапазону робочих швидкостей ВЕУ та відповідно збільшує або зменшує кількість енергії, яка відбирається вітровою установкою.

$X_5$  – площа поверхні обмаху ротора. Від даного параметру прямо пропорційно залежать навантаження на ротор та кількість матеріалу, яку буде містити ротор, що, відповідно, впливає на навантаження на інші конструкційні елементи установки, її габарити, масу тощо. В результаті все це пропорційно збільшує витрати на виготовлення вітрових установок, їх монтаж та експлуатацію.

Існуючі варіанти конструктивного виконання вітрових установок:

P1 – горизонтально-осьові вітроустановки лопатевого типу;

P2 – вертикально-осьові вітроустановки з ротором Дар'є;

P3 – вертикально-осьові вітроустановки з ротором Савоніуса;

P4 – вертикально-осьові карусельні вітроустановки.

Для визначення максимально ефективної, за вказаними вище параметрами, конструкції вітроустановки проведено порівняльний аналіз існуючих установок методом парних порівнянь, використовуючи рекомендації [8,9] та, відповідно, методику наведену в [10]. Метод парних порівнянь обрано тому, що він забезпечує можливість однозначно сформулювати основу ранжирування; має простий математичний апарат, у порівнянні з методом ієрархій, що важливо для невеликої кількості

досліджуваних параметрів. В даному методі не існує залежності думки респондента (експерта) від набору параметрів, що пропонуються для порівняння.

В таблиці 1 наведені числові значення критеріїв порівняння у відповідності з [1 - 3,5,6,11].

Таблиця 1

Вхідні дані для проведення аналізу

Критерії	Одиниці вимірювання	Індекс параметру	Вид конструкції			
			Горизонтально-осьові (лопатеві)	Вертикально-осьові (Дар'є)	Вертикально-осьові (Савоніуса)	Вертикально-осьові (карусельні)
			P1	P2	P3	P4
Коефіцієнт використання енергії вітру	–	X1	0,48	0,35	0,18	0,1
Діапазон швидкохідності	–	X2	2,5–7	4,7–7	0–1,3	0–0,6
Розрахункова швидкість*	м/с	X3	8–12	10–16	12–16	12–16
Вмикальна швидкість*	м/с	X4	3,5	3,5	4	4
Відносна площа поверхні обмаху**	–	X5	1	1	2	4

\* – числові значення розрахункової швидкості та швидкості зрушення наведені для ВЕУ потужністю 2 кВт.

\*\* – числові значення площі поверхні обмаху наведені у відносних одиницях (за базову прийнята площа поверхні лопатевої вітроустановки).

Метод парних порівнянь передбачає процес ранжирування обраних критеріїв за ступенем важливості. Для цього кожному з обраних параметрів присвоєно індекс у відповідності до їх розташування у таблиці 1. Маючи кількість критеріїв  $n$ , розраховується необхідна кількість порівнянь  $p$  за формулою

$$p = \frac{n(n-1)}{2}, \text{ штук.} \quad (1)$$

Для кількості критеріїв  $n = 5$  будемо мати необхідну кількість порівнянь  $p = 10$ .

При парному порівнянні обраних критеріїв використано три ступені їх вагомості: більш вагомий – оцінка 1,5, менш вагомий – оцінка 0,5, та рівнозначні між собою – оцінка 1. Відповідно до методики опитано 4 незалежних респондента, кожному з яких запропоновано порівняти попарно критерії X1–X5 та обрати з кожної пари більш вагомий параметр для вітрових установок. Число експертів було визначено за умови, щоб їх кількість відповідала числу досліджуваних критеріїв. Збільшення кількості респондентів не приведе до суттєвої загальної інтегральної оцінки обраних конструктивних рішень ВЕУ.

Остаточну (середню) оцінку ступеню важливості кожного з обраних критеріїв отримано як результат зіставлення оцінок кожного з експертів згідно формул:

для  $K_1$  – середня оцінка першого з двох порівнюваних критеріїв

$$K_1 = \frac{\sum_{i=1}^m B_i}{m}, \text{ балів} \quad (2)$$

де  $B_i$  – числове значення ступеня вагомості критерію, визначене кожним експертом;

для  $K_2$  – середня оцінка другого з двох порівнюваних критеріїв

$$K_2 = 2 - K_1. \quad (3)$$

Остаточні середні оцінки ступенів важливості кожного з критеріїв наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Визначення вагомості критеріїв експертами

Порівнювані критерії	Експертна оцінка				Середня оцінка порівнюваних критеріїв	
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	$K_1$	$K_2$
X1–X2	1,5	1,0	1,5	1,0	1,25	0,75
X1–X3	1,5	1,0	1,5	1,5	1,375	0,625
X1–X4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5
X1–X5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,25	0,75
X2–X3	1,0	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0
X2–X4	1,5	1,5	1,5	1,0	1,375	0,625
X2–X5	1,5	1,5	1,0	0,5	1,125	0,875
X3–X4	1,5	1,0	1,0	1,0	1,125	0,875
X3–X5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,125	0,875
X4–X5	1,0	0,5	1,0	0,5	0,75	1,25

На основі даних експертної оцінки заповнено таблицю пріоритетів критеріїв (таблиця 3). Значення, що розташовуються вище головної діагоналі матриці в таблиці 3, відповідають середнім оцінкам  $K_1$  в таблиці 2, значення, що розташовані нижче головної діагоналі – оцінкам  $K_2$ . Коефіцієнт пріоритету розраховано для кожного рядка таблиці згідно формули:

$$K_{np} = \frac{\left( \sum_{i=1}^{m-1} K_i \right)}{n \cdot (n-1)}, \text{ балів} \quad (4)$$

де  $\sum_{i=1}^{m-1} K_i$  – сума рядку в таблиці;  $n$  – кількість порівнюваних критеріїв.

Таблиця 3

Визначення пріоритету критеріїв

Індекс критерію	X1	X2	X3	X4	X5	Визначення пріоритету		Пріоритет критерію
						Сума рядку	$K_{np}$	
X1	X	1,25	1,375	1,5	1,25	5,375	0,27	1
X2	0,75	X	1,0	1,375	1,125	4,125	0,21	2
X3	0,625	1,0	X	1,125	1,125	4	0,2	3
X4	0,5	0,625	0,875	X	0,75	2,75	0,14	5
X5	0,75	0,875	0,875	1,25	X	3,75	0,19	4

На основі таблиці вхідних даних виконано бальне оцінювання кожного критерію, оцінюючи кожне значення відповідно до ступеня їх доцільності у технологічному процесі. Критеріям, що відповідають технічним вимогам найкраще, присвоюється значення 10 балів; близьким до найкращих 8 – 9 балів; достатнім 4 – 7 балів; близьким до достатніх 2 – 3 бали; недостатнім значенням 0 – 1 бал. Результати бальної оцінки наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Бальне оцінювання критеріїв

Вид конструкції		Бальна оцінка критерію				
		X1	X2	X3	X4	X5
Горизонтально-осьові (лопатеві)	P1	10	10	8	8	10
Вертикально-осьові (Дар'є)	P2	8	8	8	10	10
Вертикально-осьові (Савоніуса)	P3	4	3	5	6	5
Вертикально-осьові (карусельні)	P4	2	1	5	6	3

Після виконання бального оцінювання та знаючи вагомості критеріїв, визначені інтегральні оцінки кожного критерію. Отримані результати наведені в таблиці 5

Таблиця 5

## Інтегральна оцінка конструктивних виконань ВЕУ

Вид конструкції	Інтегральна оцінка					Сума інтегральних оцінок	Пріоритет конструкції
	X1	X2	X3	X4	X5		
Горизонтально-осьові (лопатеві)	0,27 × 10	0,21 × 10	0,2 × 8	0,14 × 8	0,19 × 10	9,42	1
Вертикально-осьові (Дар'є)	0,27 × 8	0,21 × 8	0,2 × 8	0,14 × 10	0,19 × 10	8,74	2
Вертикально-осьові (Савоніуса)	0,27 × 4	0,21 × 3	0,2 × 5	0,14 × 6	0,19 × 5	4,5	3
Вертикально-осьові (карусельні)	0,27 × 2	0,2 × 11	0,2 × 5	0,14 × 6	0,19 × 3	3,16	4

Підсумовучи вищенаведені викладки можна константувати, що для підвищення рівня енергобезпеки держави та зменшення впливу на навколишнє середовище, головна увага в розвитку вітрової енергетики повинна бути зосереджена на конструкціях горизонтально-осьових вітрових енергетичних установках лопатевого типу і, відповідно, дослідження, розробка та інвестиції повинні бути зосереджені на даному типі конструкцій.

**Висновки**

1 Запропонована методика аналізу конструкційних рішень вітроенергетичних установок методом парних порівнянь.

2 Визначені наступні критерії аналізу, а саме: коефіцієнт використання енергії вітру, швидкохідність та діапазон швидкохідності, розрахункова швидкість вітроустановки, вмикальна швидкість, площа поверхні обмаху.

3 Виконаний порівняльний аналіз чотирьох базових конструктивних рішень вітроенергетичних установок та отримані їх інтегральні оцінки. Найвищу інтегральну оцінку 9,42 отримали горизонтально-осьові вітроустановки лопатевого типу. Вертикально-осьові установки з ротором Дар'є – 8,74, а вітроустановки з ротором Савоніуса та карусельні – 4,5 та 3,16 відповідно.

**Література**

- 1 Фатеев Е.М. Ветродвиатели и ветроустановки. / Е.М. Фатеев — М. : Гос. издат. сельскохозяйственной литературы, 1948. — 547 с.
- 2 Фатеев Е.М. Ветродвиатели. / Е.М. Фатеев – М. : Государственно энергетическое издательство, 1946. — 128 с.
- 3 Vestas company brochure – режим доступу до матеріалу: <http://www.vestas.com/en/media/brochures.aspx>.
- 4 Д. де Рензо. Ветроэнергетика. / Д. де Рензо [под ред. доктора техн. наук Я.И. Шефтера] — М. : Энергоатомиздат, 1982. — 270 с.
- 5 Экспериментальные исследования ротора Савониуса с изменяемой ометаемой площадью / Э.М. Руденко, Г. Госбах, Н.А. Шихайлов, В.П. Коханевич, Ю.В. Шевченко, Ю.П. Фаворский, В.С. Попков // Научно-прикладный журнал «Відновлювана енергетика». – 2008. – № 1(12). – С. 35–39.
- 6 Минин В.А. Перспективы освоения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии на Кольском полуострове. / В.А. Минин, Г.С. Дмитриев. – Мурманск : 2007. – 93 с.
- 7 Атлас энергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / [наук. кер. проекту.: С.О. Кудря та ін.]; Вчена рада Інституту відновлюваної енергетики НАН України. – К. : «ВіолПринт», 2008. – 55 с.