

**Лещенко Ирина Григорівна**

*аспірантка кафедри АГМ та ЕМП*

*Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара*

**Лещенко Ирина Григорьевна**

*аспирантка кафедры АГМ и ЭМП*

*Днепровского национального университета имени Олеся Гончара*

**Leshchenko Irina**

*Graduate Student of the Department of AGM and EMT of the*

*Oles Honchar Dnipro National University*

## РОЗРАХУНКОВІ ПАРАМЕТРИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ ПРИ ПОМІРНИХ ШВИДКОСТЯХ ВІТРУ

## РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, КОТОРЫЕ РАБОТАЮТ ПРИ УМЕРЕННЫХ СКОРОСТЯХ ВЕТРА

## CALCULATED PARAMETERS OF WIND POWER ENGINEERING UNITS WHICH WORK AT MILLED WIND SPEEDS

**Анотація.** Розглянуто проблему оптимізації проектних параметрів вітродвигуна з горизонтальною віссю обертання у напрямку адаптації їх до метеорологічних умов України. Показано, що підвищення енерговіддачі вітроагрегатів при помірних швидкостях вітру можна досягти правильним вибором номінальних значень швидкості вітру  $V_n$  і обертальної швидкості  $\omega_n$ . На основі аналізу параметрів вітродвигуна встановлено, що вони можуть бути використані на більшій частині території України, якщо параметри будуть пристосовані певним чином до місцевих умов.

**Ключові слова:** вітроенергетика, вітродвигун, енергетичні характеристики, оптимальний параметр, вітровий потенціал.

**Аннотация.** Рассмотрено проблему оптимизации проектных параметров ветродвигателя с горизонтальной осью вращения в направлении адаптации их к метеорологическим условиям Украины. Показано, что повышения энергоотдачи ветроагрегатов при умеренных скоростях ветра можно достигнуть правильным выбором номинальных значений скорости ветра  $V_n$  и вращательной скорости  $\omega_n$ . На основе анализа параметров ветродвигателя установлено, что они могут быть использованы на большей части территории Украины, если параметры будут приспособлены определенным образом к местным условиям.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, ветродвигатель, энергетические характеристики, оптимальный параметр, ветровой потенциал.

**Summary.** The optimization procedure of wind turbines design parameters aimed at adaptation them of meteorological condition of Ukraine is considered. It is shown that increasing of energy output be obtained by the proper selection of nominal values of wind velocity  $V_n$  and rotational velocity  $\omega_n$ . It was shown that wind turbines can be used on the prevailins part of Ukrainian territory in cases, when then design parameters are properly adapted to local wind conditions.

**Key words:** wind energy, wind turbines, power characteristics, optimal design, wind potential.

**Постановка проблеми.** Економічний розвиток України, яка мусить закуповувати закордонном більш ніж половину енергоносіїв (нафта, газ, а частково й вугілля), неможливий без укріплення енергетичної бази. В умовах дефіциту мінеральних енергоресурсів нетрадиційні способи отримання електроенергії, у першу чергу — вітроенергетика,

набуває особливого значення, відповідаючи найвищим вимогам екології і електропостачання. А за умови не високих швидкостей вітру, вирішення проблеми встановлення вітродвигунів стає ще гострішим.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження складають праці таких фахівців у галузі вітроенергетики, як Yev. R. Abramovsky [3],

В. І. Карплюк [5], Ф. І. Аврахов [6], В. С. Кривцов [7], А. Є. Конеченков [8].

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Досліджується вітродвигун (ВД) з горизонтальною віссю обертання. Головною метою даної роботи є визначення тих геометричних і енергетичних параметрів вітродвигуна, які були б оптимальні для роботи в даній місцевості. Було розглянуто вітрові умови, які реалізуються у місті Дніпро. Оптимальним ми вважаємо вітродвигун, який відбирає найбільшу величину енергії вітру з  $1 \text{ м}^2$  поперечного перерізу, потоку який проходить через вітрове колесо.

**Виклад основного матеріалу.** Вітрова енергетика в останньому десятилітті розвивається досить швидкими темпами. Фахівці оцінюють темпи зростання цієї галузі на рівні 15–20 % на рік. В деяких країнах доля вітрової енергії в загальному обсязі енерговидобутку на даний час наближається до 10 %. На жаль, в Україні такий показник ще не перевищує 1 %. Це зумовлено не тільки малою кількістю встановлених вітродвигунів, але і їх низькою енерговіддачею. Справа в тому, що більшість із них недостатньо пристосовані до маловітряних умов, які існують в більшості регіонів країни. І це добре проілюстровано на сайті [1] компанії, яка займається продажем вітродвигунів. Далі приведені дані щоденного споживання електроенергії для середньостатистичного будинку:

Таблиця 1

Щоденне споживання електроенергії для середньостатистичного будинку

Прилад	Кількість спожитої енергії
Енергозберігаюча лампа (10–15 Вт)	200 Вт/год 4 год/день
Ноутбук	40 Вт/год 4 год/день
Телевізор	150 Вт/год 4 год/день
Супутникова антена	20 Вт/год 4 год/день
DVD-плеєр	20 Вт/год 2 год/день
Музичний центр	80 Вт/год 4 год/день
Холодильник	100 Вт/год 24 год/день
Пральна машина	900 Вт/год 40 хв/день
Пилосос	900 Вт/год 2 рази на тиждень 1 год
Мікрохвильова піч	900 Вт/год 0,3 год/день
Кондиціонер	1000 Вт/год 3 год/день

У таблиці 2 наведено данні від компанії-виробника вітроагрегатів WindElectric про кількість виробленої електроенергії за рік.

Таким чином зрозуміло, що у деяких регіонах країни така ВЕУ буде не достатньо ефективна. Для виходу з цієї ситуації, виробники пропонує встановлювати дві та більше вітрових установок. Але тоді виникають інші проблеми такі, як додаткові кошти і місце для ще однієї енергетичної установки. Також

багато виробників не враховують частоту повторюваності вітру конкретного міста, а лише розглядають середньо річну швидкість. Як приклад розглянемо м. Дніпро і м. Хмельник. Ці міста мають середньорічну швидкість вітру 4 м/с. З рис. 1 зрозуміло, що найчастіше, у цих містах, реалізується вітер зі швидкістю 3,5 м/с. А також кількість днів із такою швидкістю у м. Хмельник вища ніж у м. Дніпро.

Таблиця 2

Кількість виробленої електроенергії установкою WindElectric за рік

Середньорічна швидкість вітру, м/с	Вироблена енергія за рік, кВт/год
3	1445
4	3048
5	5913
6	8935
7	12864

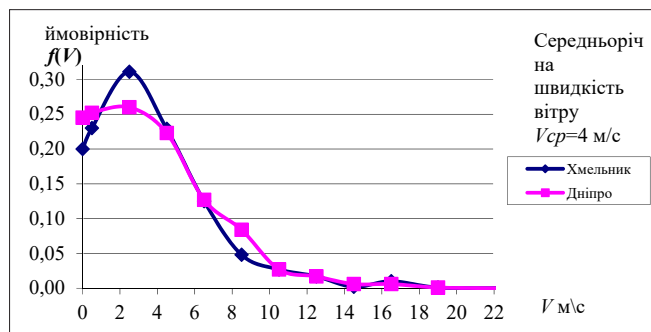


Рис. 1. Графік залежності ймовірності від швидкості вітру (м. Хмельник і м. Дніпро)

Джерело: складено автором на основі [2]

Проведемо розрахунок ВЕУ для вітрових умов заданих у таблиці 3 [2].

Розглянемо вітрову установку з лопатями, побудованими на основі профілю «Espero». Для розрахунків енергетичних та аеродинамічних характеристик використаємо метод елементарних струменів. Даний метод включає використання результатів, як імпульсної теорії, так і теорії профілю [3]. Для цього з одного боку сили, діючі на вітроколесо визначаються для кожного струменя на основі імпульсної теорії, а з іншого — ці ж самі сили визначаються із співвідношень для профілю лопатей. При цьому використовуються експериментальні дані для аеродинамічних коефіцієнтів ( $C_x, C_y$ ). Отримані вирази включають в себе невідомі індуктивні швидкості. Прирівнюючи сили, одержані з імпульсної теорії і з теорії профілю, будемо мати замкнену систему рівнянь для визначення індуктивних швидкостей.

Проектна потужність на валу генератора вважається заданою. Оптимальною назвемо ВЕУ, яка відбирає найбільшу долю енергії вітру з одиниці заданої площі, тобто площі перерізу струменя.

Таблиця 3

Частота повтору швидкостей в двох регіонах

Діапазон швидкостей V (м/с)	0–1	2–3	4–5	6–7	8–9	10–11	12–13	14–15	16–17	18–20
	Ймовірність вітру даної швидкості									
Хмельник (Вінницька обл.)	0,23	0,311	0,229	0,125	0,048	0,027	0,017	0,002	0,01	0,001
Дніпро (Дніпр-ська обл.)	0,25	0,26	0,223	0,127	0,084	0,027	0,017	0,006	0,006	0,001

Вибір параметрів оснований, насамперед, на принципі побудови оптимального ротора, який забезпечує максимум коефіцієнта потужності

$$C_p = \frac{P}{P_0},$$

де  $P_0$  — потужність потоку, що набігає і перетікає через задану поверхню,  $P$  — потужність на валу генератора.

Крім того, вважається, що номінальна швидкість вітру і кількість обертів обирається з умов максимальної енерговіддачі вітродвигуна ( $\bar{E}$  кВт/м<sup>2</sup>) на місцевості, де його встановили. На цій території повинна бути відома середньорічна швидкість вітру  $V_{cp}$  і частота повтору вітру. При виборі  $C_{pm}$  необхідно відповідним чином підібрати залежності  $b(\bar{r})$  і  $\varphi(\bar{r})$ , де  $b$  — хорда профілю,  $\varphi$  — кут геометричної крутки лопаті. Скористаємося методом елементарних струменів, який зводиться до розв'язку системи рівнянь за допомогою методу послідовних наближень Вілсона — Уокера [4].

$$tg\beta = \frac{1 - \bar{V}_1}{\lambda \cdot \bar{r} + \bar{U}_1}, \tag{1}$$

$$\frac{\bar{V}_1}{1 - \bar{V}_1} = \frac{(l \cdot \bar{b} / \pi) \cdot (C_y \cos\beta + C_x \sin\beta)}{8 \cdot \bar{r} \sin^2\beta}, \tag{2}$$

$$\frac{\bar{U}_1}{\lambda \cdot \bar{r} + \bar{U}_1} = \frac{(l \cdot \bar{b} / \pi) \cdot (C_y \cos\beta - C_x \sin\beta)}{8 \cdot \bar{r} \sin\beta \cos\beta}, \tag{3}$$

$$\alpha = \beta - \varphi, \tag{4}$$

де  $\bar{r}$  — відносний радіус вітроколеса ( $\bar{r} = r/R$ ),  $\bar{V}_1$ ,  $\bar{U}_1$  — індуктивні швидкості,  $\beta$  — кут натікання потоку на лопаті,  $\bar{b}$  — відносна хорда профілю ( $\bar{b} = b/R$ ),  $\lambda$  — коефіцієнт швидкості ( $\lambda = \omega R/V_0$ ),  $\alpha$  — кут атаки,  $l$  — кількість лопатей.

Розв'яжемо дану систему за умов, що у кожному перерізі лопаті реалізується максимальне значення аеродинамічної якості  $K_{max} = C_y/C_x$ . Це означає, що кут  $\alpha_0$  при якому  $K = K_{max}$  відомий і необхідно визначити невідомі  $\bar{b}$ ,  $\bar{V}_1$ ,  $\bar{U}_1$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$ , при кожному значенні  $\lambda$ . Коефіцієнт потужності ротора визначається з виразу

$$C_p = 8 \cdot \lambda \int_{\bar{r}} (1 - \bar{V}_1)(\bar{U}_1 \cdot \bar{r})^2 d\bar{r}. \tag{5}$$

В рівняннях (1)–(4) маємо чотири невідомих, а саме,  $\bar{V}_1$ ,  $\bar{U}_1$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$ . Відносна хорда  $\bar{b}(\bar{r})$  є змінною

величиною, яка задається в певному діапазоні до отримання максимуму локального значення  $C_p(\bar{r})$ . Перше наближення задається виразом (6).

$$\bar{b} = \frac{16 \cdot \pi}{9 \cdot l \cdot C_y \cdot \lambda} \sqrt{\frac{1}{\lambda \cdot \bar{r}^2 + 4/9}}. \tag{6}$$

Для визначення  $C_x$ ,  $C_y$  необхідно знати кут атаки  $\alpha$  і відносну товщину лопаті  $\bar{\delta}$ . Кут атаки в даному випадку дорівнює  $\alpha_0$ . Товщина лопаті задається виразом:

$$\bar{\delta}(\bar{r}) = \bar{\delta}_0 - (\bar{\delta}_0 - \bar{\delta}_k) \frac{\bar{r} - \bar{r}_0}{1 - \bar{r}_0}. \tag{7}$$

Таблиці для визначення  $C_x$ ,  $C_y$  представлено у роботі [5].

Річну енерговіддачу вітродвигуна на одиницю площі омітання ротора  $\bar{E} = E/S$ , де  $S = \pi R^2$ .  $\bar{E}$  обчислюється за формулою [6]:

$$\bar{E} = \frac{\rho T}{2000} \int_{V_c}^{V_H} V^3 C_p(V) f(V) dV + \frac{P_H T}{S} \int_{V_H}^{V_k} f(V) dV, \tag{8}$$

де  $T$  — кількість годин на рік,  $P_H$  — номінальна потужність (задана величина),  $V_c$  — стартова швидкість (3 м/с),  $V_k$  — швидкість вимкнення при буревії (25 м/с).

Заданими величинами будемо вважати:  $\lambda_m$ ,  $C_{pm}$  (вони отримані на першому етапі,  $P_H$ ,  $\eta$  — коефіцієнт втрат ( $\eta \approx 0,8$ ), а також залежність  $C_p(\lambda)$ , яка при  $\omega = \omega_H = \text{const}$  буде  $C_p(V)$ .

При цьому

$$P_H = \frac{\rho V_H^3}{2} S \cdot C_{pm} \cdot \eta, \tag{9}$$

$$\lambda_m = \frac{\omega_H R}{V_H}, \tag{10}$$

$$S = \pi R^2. \tag{11}$$

Ці формули дають можливість визначити  $\omega_H$

$$\omega_H = \sqrt{\frac{\rho \eta C_{pm} \pi \lambda_m^2 V_H^5}{2 P_H}}. \tag{12}$$

Змінним параметром будемо вважати  $V_H$ . Першим наближенням можна взяти  $V_H = 2V_{cp}$ , де  $V_{cp}$  — середньорічна швидкість вітру в заданій місцевості.

В вихідних даних номінальна потужність  $P_H$  була задана і дорівнює 45 кВт. Для вітродвигуна з такою потужністю отримана номінальна швидкість

$V_H = 8$  м/с. Така швидкість забезпечує максимальне значення енерговіддачі на одиниці площі  $\bar{E}$  і дорівнює  $130,7$  Вт/м<sup>2</sup>.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі.** Дана методика дозволяє створити вітродвигун, який був би оптимальним для заданої місцевості. Одержані

результати дозволяють провести аналіз впливу середньорічної швидкості вітру та частоти повторюваності вітру на геометричні і енергетичні параметри вітродвигуна. Дані розрахунки можна використовувати при створенні вітродвигуна у місті Дніпро. Наведену методику можна використовувати для розрахунку вітродвигунів у інших місцях.

#### Література

1. [http://www.siriusone.net/index.php?action=page&page\\_id=41&lang=ru](http://www.siriusone.net/index.php?action=page&page_id=41&lang=ru) (18.10.2017).
2. Справочник по климату СССР. / Украинская ССР, Гидрометеорология, вип. 10, ч. 3. — С. 235–300.
3. Abramovsky Yev.R. Aerodynamic theory of wind turbines / Yev.R. Abramovsky / Study guide — Dnipropetrovsk: Nauka i osvita, 2008. — 242 pp.
4. Wilson R. E. Aerodynamic performance of wind turbines. / R. E. Wilson, B. S. Lissaman, R. N. Walker / Washington, 1976. — 194 p.
5. Карплюк В. І. Посібник до вивчення дисципліни аеродинаміка вітроенергетичних установок. / В. І. Карплюк, М. М. Личагін / Посібник до вивчення дисципліни. — Д.: РВВ ДНУ, 2008. — 56 с.
6. Абрамовський Є. Р. Задачі і вправи з вітроенергетики. / Є. Р. Абрамовський, Ф. І. Аврахов, М. М. Личагін, І. Г. Лещенко / Навчальний посібник. — Д.: Наука і Освіта, 2012. — 152 с.
7. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия. / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев / Учебник. — Харьков, Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ»; Севастополь, Севастопольский нац. технич. ун-т, — 2003. — Кн. 1: Ветроэлектрогенераторы. — 400 с.
8. Конеченков А. Є. Вітрові електростанції. Настанова з розробки та супроводження проектів у сфері вітроенергетики. / А. Є. Конеченков, Г. Б. Шмідт, Я. А. Петров // Всеукраїнська енергетична асамблея. — Х.: Фоліо. — 2017. — 133 с.

#### References

1. [http://www.siriusone.net/index.php?action=page&page\\_id=41&lang=ru](http://www.siriusone.net/index.php?action=page&page_id=41&lang=ru) (18.10.2017).
2. Spravochnik po klimatu SSSR. / Ukrainskaya SSR, Gidrometeorologiya, you. 10, ch. 3. — S. 235–300.
3. Abramovsky Yev.R. Aerodynamic theory of wind turbines / Yev.R. Abramovsky / Study guide — Dnipropetrovsk: Nauka i osvita, 2008. — 242 pp.
4. Wilson R. E. Aerodynamic performance of wind turbines. / R. E. Wilson, B. S. Lissaman, R. N. Walker / Washington, 1976. — 194 p.
5. Karplyuk V. I. Posibnik do vivchennya discipline aerodinamika vetroenergetichnih ustonovok. / V. I. Karplyuk, M. M. Lichagin / Posibnik do vivchennya disciplini. — D.: RVV DNU, 2008. — 56 s.
6. Abramovsky Yev.R. Zadachi i vpravi z vitroenergetiki. / Yev.R. Abramovsky, F. I. Avrahov, M. M. Lichagin, I. G. Leshchenko / Navchalnij posibnik. — D.: Nauka i Osvita, 2012. — 152 s.
7. Krivcov V. S. Neischerpaemaya energiya. / V. S. Krivcov, A. M. Olejnikov, A. I. Yakovlev / Uchebnik. — Kharkov, Nat. aero-kosm.un-t «KhAI; Sevastopol, the Sevastopol nat. technical. University, 2003. — Book. 1: Wind power generators. — 400 s. — 400 s.
8. Konechenkov A. E. Vitrovi elektrostancii. Nastanova z rozrobki ta suprovodjennya proektiv u sferi vitroenergetiki. / A. E. Konechenkov, G. B. Shmidt, Ya. A. Petrov / All-Ukrainian energy is ensemble. — H.: Folio. — 2017. — 133 p.