

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 135302

СПОСІБ ОЦІНЮВАННЯ ВИРОБІТКУ ВІТРЯНОЇ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТУРБИНИ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **25.06.2019**.

Заступник Міністра економічного
розвитку і торгівлі України

Ю.П. Бровченко



(21) Номер заявки: **u 2019 00597**(22) Дата подання заявки: **21.01.2019**(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.06.2019**(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **25.06.2019, Бюл. № 12**

(72) Винахідники:

Подгуренко Володимир Сергійович, UA,
Терехов Володимир Євгенович, UA,
Гетманець Олег Михайлович, UA,
Черепанов Антон Іванович, UA

(73) Власники:

Подгуренко Володимир Сергійович,
вул. Декабристів, 38/1, кв. 9, м. Миколаїв, 54017, UA,
Терехов Володимир Євгенович,
вул. Лазурна, 4-Г, кв. 32, м. Миколаїв, 54058, UA,
Гетманець Олег Михайлович,
пр. Незалежності, 5, кв. 139, м. Харків, 61058, UA,
Черепанов Антон Іванович,
вул. Адміральська, 28, кв. 66, м. Миколаїв, 540001, UA

(54) Назва корисної моделі:

СПОСІБ ОЦІНЮВАННЯ ВИРОБІТКУ ВІТРЯНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТУРБІНИ

(57) Формула корисної моделі:

Спосіб оцінювання виробітку вітрової електричної турбіни, що полягає у визначенні середньої швидкості вітру $\bar{V}_0$ на фіксованій висоті Z_0 , де розташований стандартний флюгер, а також середніх значень метеопараметрів на тій ж самій висоті, який **відрізняється** тим, що з диференціального розподілу швидкості вітру визначають коефіцієнт варіації CV , а за його значенням та значенням $\bar{V}_0$ обчислюють параметри диференційного розподілу Вейбулла-Гніденко; потім моделюють потужнісну характеристику вітротурбіни у вигляді поліному ступеня не нижче третього за швидкістю вітру; потужність вітротурбіни P на різних висотах обчислюють як згортку розподілу Вейбулла та потужнісної характеристики вітротурбіни; далі розраховують показник ступеневої залежності m потужності турбіни від висоти розташування осі вітроколеса згідно з формулою:

$$m = -0,18475 \cdot \bar{V}_0 + 0,001302 \cdot \rho_0,$$

де ρ_0 - середній атмосферний тиск на висоті розташування флюгера під час вимірювань;

остаточно передбачувану залежність потужності вітротурбіни $P(z)$ від висоти z розташування осі вітроколеса визначають згідно з формулою:

$$P(z) = P_0 \cdot \left(\frac{z}{z_0} \right)^m,$$

де P_0 - умовна потужність турбіни на висоті флюгера.

(11) 135302

Державне підприємство
«Український інститут інтелектуальної власності»
(Укрпатент)

Оригіналом цього документа є електронний документ з відповідними реквізитами, у тому числі з накладеним електронним цифровим підписом уповноваженої особи Міністерства економічного розвитку і торгівлі України та сформованою позначкою часу.

Ідентифікатор електронного документа 3446200619.

Для отримання оригіналу документа необхідно:

1. Зайти до ІДС «Стан діловодства за заявками на винаходи та корисні моделі», яка розташована на сторінці <http://base.uipv.org/searchInvStat/>.
2. Виконати пошук за номером заявки.
3. У розділі «Документи Укрпатенту» поруч з реєстраційним номером документа натиснути кнопку «Завантажити оригінал» та ввести ідентифікатор електронного документа.

Ідентичний за документарною інформацією та реквізитами паперовий примірник цього документа містить 3 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами.

Уповноважена особа Укрпатенту

І.Є. Матусевич

25.06.2019





УКРАЇНА

(19) UA (11) 135302 (13) U
(51) МПК (2019.01)
F03D 1/00
G01P 5/00

МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2019 00597	(72) Винахідник(и): Подгуренко Володимир Сергійович (UA), Терехов Володимир Євгенович (UA), Гетманець Олег Михайлович (UA), Черепанов Антон Іванович (UA)
(22) Дата подання заявки: 21.01.2019	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.06.2019	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.06.2019, Бюл.№ 12	(73) Власник(и): Подгуренко Володимир Сергійович, вул. Декабристів, 38/1, кв. 9, м. Миколаїв, 54017 (UA), Терехов Володимир Євгенович, вул. Лазурна, 4-Г, кв. 32, м. Миколаїв, 54058 (UA), Гетманець Олег Михайлович, пр. Незалежності, 5, кв. 139, м. Харків, 61058 (UA), Черепанов Антон Іванович, вул. Адміральська, 28, кв. 66, м. Миколаїв, 540001 (UA)

(54) СПОСІБ ОЦІНЮВАННЯ ВИРОБІТКУ ВІТРЯНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТУРБІНИ

(57) Реферат:

Спосіб оцінювання виробітку вітрової електричної турбіни полягає у визначенні середньої швидкості вітру $\bar{V}_0$ на фіксованій висоті z_0 , де розташований стандартний флюгер, а також середніх значень метеопараметрів на тій ж самій висоті. При цьому з диференціального розподілу швидкості вітру визначають коефіцієнт варіації C_V , а за його значенням та значенням $\bar{V}_0$ обчислюють параметри диференційного розподілу Вейбулла-Гніденко. Потім моделюють потужнісну характеристику вітротурбіни у вигляді поліному ступеня не нижче третього за швидкістю вітру. Потужність вітротурбіни P на різних висотах обчислюють як згортку розподілу Вейбулла та потужнісної характеристики вітротурбіни. Далі розраховують показник ступеневої залежності m потужності турбіни від висоти розташування осі вітроколеса згідно з формулою:

$$m = -0,18475 \cdot V_0 + 0,001302 \cdot \rho_0,$$

де ρ_0 - середній атмосферний тиск на висоті розташування флюгера під час вимірювань.

Остаточню передбачувану залежність потужності вітротурбіни $P(z)$ від висоти z розташування осі вітроколеса визначають згідно з формулою:

$$P(z) = P_0 \cdot \left(\frac{z}{z_0} \right)^m,$$

де P_0 - умовна потужність турбіни на висоті флюгера.

UA 135302 U

Корисна модель належить до галузі вітрової енергетики і стосується оцінювання виробітку вітрової турбіни на певній території при проектуванні та побудові вітрових електростанцій на підставі виміряних середніх значень параметрів розподілу швидкості вітру та метеопараметрів.

Відомий спосіб [1] оцінювання виробітку вітрової турбіни за значенням середньої місячної або річної швидкості вітру $\bar{V}$ на певній території, згідно з яким питома потужність вітрового потоку є пропорційною $\bar{V}^3$. Недоліками відомого способу є застосування недостатньо обґрунтованих спрощених емпіричних залежностей для розподілу швидкості вітру, а також повне ігнорування потужнісної характеристики конкретної вітротурбіни, тобто залежності потужності турбіни від швидкості вітру.

Найбільш близьким аналогом до корисної моделі, що пропонується, є спосіб розрахунку виробітку електроенергії і часу роботи вітроелектричної установки для довільного діапазону зміни робочих швидкостей вітру, який ґрунтується на апроксимації емпіричної залежності повторюваності швидкостей вітру за допомогою розподілу Вейбулла-Гніденко [2].

Згідно з відомим способом [2], виробіток вітротурбіни Q в кВт·год. визначається згідно з наступною формулою:

$$Q = T K_T K_M \int_0^{\infty} P(V) \cdot f(V) dV, \quad (1)$$

де T - час роботи турбіни; K_T - коефіцієнт технічної готовності турбіни; K_M - коефіцієнт простою; $P(V)$ - потужнісна характеристика вітротурбіни; $f(V)$ - диференціальний розподіл швидкості вітру, який, як відомо, добре описується розподілом Вейбулла-Гніденко [3]:

$$f(V) = \frac{c}{b} \left(\frac{V}{b} \right)^{\frac{c}{b}-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{b} \right)^{\frac{c}{b}} \right],$$

параметри розподілу a , b і c оцінюють за даними спостережень.

Недоліком відомого способу [2] є заміна інтегрування у формулі (1) підсумовуванням з урахуванням повторюваності значень швидкості вітру з дискретністю 2 м/с (що відповідає методиці обробки результатів вимірювань на метеостанціях). Це суттєво зменшує точність і надійність оцінки виробітку і ускладнює можливість встановлення аналітичного зв'язку між виробітком та іншими параметрами.

Тому задачею корисної моделі, що пропонується, є розробка простого способу оцінювання виробітку вітрової турбіни за допомогою обмеженої кількості виміряних параметрів розподілу швидкості вітру та інших метеопараметрів на висоті розташування стандартного флюгера (близько 10 м) та одержання простих аналітичних виразів для залежності виробітку вітротурбіни на певній місцевості від висоти розташування осі вітроколеса.

Поставлена задача вирішується шляхом одночасного вимірювання середнього значення швидкості вітру $\bar{V}$ на висоті розташування флюгера z_0 та будь-якої іншої характеристики, що є похідною від другого і першого початкових моментів розподілу швидкості вітру (середнього квадрата швидкості або стандартного відхилення від середнього значення, або коефіцієнта варіації та ін.), а також метеопараметрів на висоті розташування флюгера - температури T_0 і атмосферного тиску p_0 , та визначення параметрів розподілу Вейбулла-Гніденко a , b і c , а потім моделювання потужнісної характеристики вітротурбіни у вигляді полінома за швидкістю вітру та обчислення умовного виробітку турбіни Q_0 за умови розташування осі вітроколеса на висоті флюгера, потім визначення показника ступеневої залежності m виробітку турбіни від висоти та одержання аналітичної залежності для виробітку вітротурбіни від висоти z розташування осі вітроколеса.

Спосіб оцінювання виробітку вітрової електричної турбіни, що полягає у визначенні середньої швидкості вітру $\bar{V}_0$ на фіксованій висоті z_0 , де розташований стандартний флюгер, а також середніх значень метеопараметрів на тій ж самій висоті, згідно з корисною моделлю, з диференціального розподілу швидкості вітру визначають коефіцієнт варіації C_v , а за його значенням та значенням $\bar{V}_0$ обчислюють параметри диференційного розподілу Вейбулла-Гніденко; потім моделюють потужнісну характеристику вітротурбіни у вигляді полінома ступеня не нижче третього за швидкістю вітру; потужність вітротурбіни P на різних висотах обчислюють як згортку розподілу Вейбулла та потужнісної характеристики вітротурбіни; далі розраховують показник ступеневої залежності m потужності турбіни від висоти розташування осі вітроколеса згідно з формулою: $m = -0,18475 \cdot \bar{V}_0 + 0,001302 \cdot p_0$, де p_0 - середній атмосферний тиск на

висоті розташування флюгера під час вимірювань; остаточно передбачувану залежність потужності вітротурбіни $P(z)$ від висоти z розташування осі вітроколеса визначають згідно з формулою:

$$P(z) = P_0 \cdot \left(\frac{z}{z_0} \right)^m, \text{ де } P_0 - \text{ умовна потужність турбіни на висоті флюгера.}$$

- 5 Для пояснення запропонованого способу повернемося до формули (1), що описує виробіток турбіни. Надалі на час відкинемо всі коефіцієнти у цій формулі і будемо розраховувати виробіток за одну годину (назвемо його "наведеною потужністю" P), тобто:

$$P = \int_0^{\infty} P(V) \cdot f(V) dV. \quad (2)$$

Інтеграл (2) являє собою так звану "згортку" двох функцій - характеристики турбіни $P(V)$ і диференціальної характеристики розподілу швидкості вітру $f(V) = \frac{c}{b} \left(\frac{V}{b} \right)^{c-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{b} \right)^c \right]$, яка

- 10 залежить як правило від двох параметрів розподілу Вейбулла-Гніденко b і c (при цьому сміливо можна прийняти $a=0$, бо в більшості спостережень $f(0)=0$).

Розглянемо основні початкові моменти розподілу Вейбулла-Гніденко. Як відомо, першим

початковим моментом є середня швидкість вітру V :

$$V = \int_0^{\infty} V \cdot \frac{c}{b} \left(\frac{V}{b} \right)^{c-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{b} \right)^c \right] dV = \frac{b}{c} \int_0^{\infty} x^{\frac{1}{c}} e^{-x} dx = \frac{b}{c} \cdot \Gamma \left(\frac{1}{c} + 1 \right), \quad (3)$$

- 15 де $\Gamma \left(\frac{1}{c} \right)$ - гамма-функція: $\Gamma \left(\frac{1}{c} \right) = \int_0^{\infty} x^{\frac{1}{c}-1} e^{-x} dx$ (у формулі (3) зроблено перехід від V до

"змінної Вейбулла-Гніденко" $x = \left(\frac{V}{b} \right)^c$, тоді $V = b \cdot x^{\frac{1}{c}}$).

Аналогічно середній квадрат швидкості вітру $\overline{V^2}$ є другим початковим моментом розподілу Вейбулла-Гніденко:

$$\overline{V^2} = \int_0^{\infty} V^2 \cdot \frac{c}{b} \left(\frac{V}{b} \right)^{c-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{b} \right)^c \right] dV = \frac{b^2}{c} \int_0^{\infty} x^{\frac{2}{c}-1} e^{-x} dx = b^2 \cdot \Gamma \left(\frac{2}{c} + 1 \right). \quad (4)$$

- 20 Якщо відомі значення $\overline{V}$ і $\overline{V^2}$, то можна скласти відношення
- $$\delta = \frac{\overline{V^2}}{\overline{V}^2} = \frac{\Gamma \left(\frac{1}{c} + 1 \right)^2}{\Gamma \left(\frac{2}{c} + 1 \right)},$$
- із якого

$$b = \frac{\overline{V} \cdot c}{\Gamma \left(\frac{1}{c} \right)}$$

безпосередньо визначають значення c , а потім за формулою визначають значення параметра b .

- 25 Застосовуючи таблиці гамма-функцій і відповідні рекурентні співвідношення [4], можна одержати наступну інтерполяційну формулу для залежності параметра c від δ в явному вигляді: $c = 97,38860 - 592,93565 \delta + 1346,40103 \delta^2 - 1341,04960 \delta^3 + 497,83854 \delta^4$. (5)

На фіг. 1 ця залежність наведена для широкого діапазону зміни c . Тут також для порівняння точками показані точні значення параметра c при деяких фіксованих значеннях δ .

Тепер визначення параметрів моделі Вейбулла-Гніденко виглядає наступним чином: 1) за

фактичними даними обчислюють $\overline{V}$ і $\overline{V^2}$; 2) складають відношення $\delta = \frac{\overline{V^2}}{\overline{V}^2}$; 3) за формулою

$$b = \frac{\bar{V} \cdot c}{\Gamma\left(\frac{1}{c}\right)}$$

(5) знаходять значення c ; 4) зі співвідношення [4], знаходять значення b .

Якщо застосовувати похідні від перших двох початкових моментів розподілу Вейбулла-Гніденко, наприклад, стандартне відхилення (від середньої швидкості): $\sigma = \sqrt{\overline{V^2} - \bar{V}^2}$ та

коефіцієнт варіації $C_V = \frac{\sigma}{\bar{V}}$, то можна довести, що $\delta = \frac{\overline{V^2}}{\bar{V}^2} = \frac{\overline{V^2}}{\bar{V}^2 + \sigma^2} = \frac{1}{1 + C_V^2}$. Тобто, параметр Вейбулла-Гніденко c визначається лише коефіцієнтом варіації C_V , оскільки δ у формулі (5) залежить тільки від C_V .

Можна вважати, що диференціальний розподіл швидкості вітру $f(V)$ на даному майданчику на певній висоті характеризує вітроенергетичний потенціал.

10 Перейдемо до моделювання потужнісної характеристики турбіни $P(V)$. В загальному випадку її можна параметризувати у вигляді полінома k -го ступеня за V : $P(V) = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + \dots + a_k V^k$ ($k \geq 3$). Остання умова витікає із міркувань, що середня потужність вітру повинна бути пропорційною V^3 [1].

15 Реальна турбіна характеризується пороговим значенням швидкості вітру V_0 , починаючи з якого вона видає струм, та номінальним значенням швидкості вітру V_N , коли турбіна виходить на постійну номінальну потужність P_N .

З урахуванням "воріт" для швидкості вітру V наведена потужність генерації турбіни P визначається наступним виразом, який витікає з інтегралу (2):

$$P = a_0(e^{-x_0} - e^{-x_N}) + a_1 b \cdot \left[\gamma\left(\frac{1}{c} + 1, x_N\right) - \gamma\left(\frac{1}{c} + 1, x_0\right) \right] + a_2 b^2 \cdot \left[\gamma\left(\frac{2}{c} + 1, x_N\right) - \gamma\left(\frac{2}{c} + 1, x_0\right) \right] + \dots$$

$$\dots + a_k b^k \cdot \left[\gamma\left(\frac{k}{c} + 1, x_N\right) - \gamma\left(\frac{k}{c} + 1, x_0\right) \right] + P_N \cdot e^{-x_N},$$

20 (6)

$$\gamma\left(\frac{k}{c} + 1, x\right) - \text{неповна гамма-функція: } \gamma\left(\frac{k}{c} + 1, x\right) = \int_0^x t^{\frac{k}{c}} \cdot e^{-t} dt \quad ; \quad x_0 = \left(\frac{V_0}{b}\right)^c \quad ; \quad x_N = \left(\frac{V_N}{b}\right)^c$$

$$x = \left(\frac{V}{b}\right)^c.$$

(тут також зроблено перехід від V до "змінної Вейбулла-Гніденко" Зауважимо, що неповна гамма-функція добре табульована [4] та знаходиться в бібліотеках стандартних функцій найбільш поширених обчислювальних програм: MS Excel, MathCAD, MATHLAB, Maple та ін.

25 Таким чином, знаючи параметри розподілу Вейбулла-Гніденко b і c за результатами вимірювань розподілу швидкості вітру на певних висотах $z_1, z_2, \dots, z_m$ та потужнісну характеристику вітротурбіни $P(V)$, можна для будь-якого заданого рівня точності обчислити значення наведеної потужності турбіни на цих висотах: $P_1(z_1), P_2(z_2), \dots, P_m(z_m)$. Потім,

$$P(z) = P_0(z_0) \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)^m$$

30 застосовуючи ступеневу модель як "лінії тренду", можна однозначно одержати значення "умовної потужності" $P_0(z_0)$ на висоті розташування стандартного флюгера z_0 та значення показника ступеня m . Оскільки за європейськими стандартами $z_0 = 10$ м, що значно менше радіуса вітроколеса сучасних турбін, то "умовну потужність" $P_0(z_0)$ слід формально розуміти як нормуючу сталу для ступеневої моделі. Тепер, згідно з запропонованою

35 корисною моделлю, потрібно розв'язати зворотну задачу: як на підставі вимірювань, що були проведені на висоті розташування стандартного флюгера z_0 , зробити передбачення щодо оцінки виробітку вітротурбіни на різних реальних висотах розташування осі вітроколеса.

Для пояснення запропонованого способу застосуємо результати власних досліджень, які були проведені на метеопосту "Іванівка" в Очаківському районі Миколаївської області ТОВ "Вітряний парк Очаківський" в період з 15.08.2011 р. по 16.08.2012 р. (усього 8605 годин вимірювань). Швидкість вітру вимірювали за допомогою анемометрів одночасно на висотах 50 м, 80 м і 100 м. Температуру повітря вимірювали на висоті 100 м, а атмосферний тиск на висотах від 8 м до 10 м.

Результати обробки усього масиву даних за допомогою інструмента "Описова статистика" MS Excel-2010 наведено в таблиці 1 ("Рахунок" - це кількість годин вимірювань).

Таблиця 1

Сезонний розподіл швидкості вітру за даними метеопоста "Іванівка"

ШВИДКІСТЬ ВІТРУ					
ВЕСНА					
Висота 50 м		Висота 80 м		Висота 100 м	
Середнє	6,41139	Середнє	6,95882	Середнє	7,30121
Стандартна помилка	0,05534	Стандартна помилка	0,06213	Стандартна помилка	0,06714
Медіана	6,32662	Медіана	6,784653	Медіана	7,06506
Мода	4,34165	Мода	6,262044	Мода	5,72371
Стандартне відхилення	2,60061	Стандартне відхилення	2,91951	Стандартне відхилення	3,15489
Дисперсія вибірки	6,76315	Дисперсія вибірки	8,523511	Дисперсія вибірки	9,953322
*Cv	0,4056	*Cv	0,4195	*Cv	0,4321
Рахунок	2208	Рахунок	2208	Рахунок	2208
ЛІТО					
Висота 50 м		Висота 80 м		Висота 100 м	
Середнє	6,36019	Середнє	6,86239	Середнє	7,15413
Стандартна помилка	0,04916	Стандартна помилка	0,05374	Стандартна помилка	0,05660
Медіана	6,19440	Медіана	6,75787	Медіана	7,03836
Мода	3,30675	Мода	5,90318	Мода	3,05626
Стандартне відхилення	2,22759	Стандартне відхилення	2,434783	Стандартне відхилення	2,564515
Дисперсія вибірки	4,96215	Дисперсія вибірки	5,92817	Дисперсія вибірки	6,57674
*Cv	0,3502	*Cv	0,3548	*Cv	0,3585
Рахунок	2053	Рахунок	2053	Рахунок	2053
ОСІНЬ					
Висота 50 м		Висота 80 м		Висота 100 м	
Середнє	5,78074	Середнє	6,27213	Середнє	6,70961
Стандартна помилка	0,04708	Стандартна помилка	0,05511	Стандартна помилка	0,05847
Медіана	5,67580	Медіана	6,17175	Медіана	6,55729
Мода	4,44866	Мода	5,57492	Мода	3,36528
Стандартне відхилення	2,18822	Стандартне відхилення	2,561483	Стандартне відхилення	2,717272
Дисперсія вибірки	4,78832	Дисперсія вибірки	6,56119	Дисперсія вибірки	7,38357
*Cv	0,3790	*Cv	0,4080	*Cv	0,4050
Рахунок	2160	Рахунок	2160	Рахунок	2160
ЗИМА					
Висота 50 м		Висота 80 м		Висота 100 м	
Середнє	7,10777	Середнє	7,88942	Середнє	8,32709
Стандартна помилка	0,06427	Стандартна помилка	0,06914	Стандартна помилка	0,07261
Медіана	6,86128	Медіана	7,72542	Медіана	8,20117

Таблиця 1

Сезонний розподіл швидкості вітру за даними метеопоста "Іванівка"

Мода	0,25400	Мода	1,77281	Мода	5,80917
Стандартне відхилення	3,00371	Стандартне відхилення	3,23137	Стандартне відхилення	3,39314
Дисперсія вибірки	9,02227	Дисперсія вибірки	10,44177	Дисперсія вибірки	11,51342
*Cv	0,4226	*Cv	0,4096	*Cv	0,4075
Рахунок	2184	Рахунок	2184	Рахунок	2184

*Примітка: інструмент "Описова статистика" програми Excel-2010 не виводить значень Cv, тому цей рядок було розраховано шляхом поділки 5-го рядка на 1-й.

Потім за значеннями параметрів $\bar{V}$ і Cv обчислювали параметри Вейбулла b і c для розподілу швидкості вітру, згідно з методикою, що була описана вище.

5 Подальше оцінювання наведеної потужності вітротурбіни було проведено на прикладі сучасної ВЕУ FL 2500-100 (Німеччина) номінальної потужності $P_N=2500$ кВт, для якої початкова швидкість вітру становить близько $V_0=3$ м/с, а номінальна близько $V_N=13$ м/с. Потужнісну характеристику турбіни можна добре моделювати наступним поліномом 5-го ступеня за V ($R^2=0,993$):

10 $P(V)=(-2293,14098+1902,83735 \cdot V-600,37994 \cdot V^2+89,10042 \cdot V^3-5,65921 \cdot V^4+0,12780 \cdot V^5) \cdot \theta(V-V_0) \cdot \theta(V_N-V)+2500 \cdot \theta(V-V_N)$, (7)

$$\theta(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x; \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

де були застосовані ступінчасті тета-функції Хевісайда:

Відповідний графік для P(V) представлений на фіг. 2. Наведена потужність турбіни на висотах 50, 80 і 100 м була розрахована на підставі формули (6) з урахуванням виразу (7).

15 Паралельно були розраховані параметри ступеневої залежності для $\bar{V}$, Cv, а також параметри розподілу Вейбулла-Гніденко b і c від висоти за допомогою програми MS Excel-2010 (команди "Додати лінію тренду": "Ступеневий тренд"). Тим самим одночасно одержали значення кожного відповідного параметра на висоті розташування флюгера $z_0=10$ м і показник ступеневої залежності m для кожного з цих параметрів. Результати наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати розрахунків середніх сезонних значень параметрів розподілу швидкості вітру та нормованої потужності вітротурбіни на різних висотах

Сезон року	Параметри	Висота, м				m
		10	50	80	100	
1. Весна (2208 годин)	$\bar{V}$, м/с	4,73	6,411	6,959	7,301	0,188
	Cv	0,352	0,406	0,420	0,432	0,087
	b, м/с	5,325	7,219	7,845	8,237	0,188
	c	3,081	2,580	2,471	2,387	-0,109
	P, кВт	388,4	752,2	909,4	1000,4	0,410
2. Літо (2053 годин)	$\bar{V}$, м/с	4,85	6,360	6,862	7,154	0,169
	Cv	0,332	0,350	0,355	0,358	0,033
	b, м/с	5,399	7,108	7,676	8,006	0,170
	c	3,358	3,135	3,007	3,044	-0,043
	P, кВт	346,8	700,6	857,3	947,6	0,436
3. Осінь (2160 годин)	$\bar{V}$, м/с	4,04	5,781	6,272	6,710	0,217
	Cv	0,322	0,379	0,408	0,405	0,105
	b, м/с	4,588	6,490	7,064	7,555	0,213

Таблиця 2

Результати розрахунків середніх сезонних значень параметрів розподілу швидкості вітру та нормованої потужності вітротурбіни на різних висотах

Сезон року	Параметри	Висота, м				m
		10	50	80	100	
4. Зима (2184 годин)	c	3,496	2,823	2,564	2,588	-0,138
	P, кВт	216,3	555,1	714,1	836,1	0,582
	$\bar{V}$, м/с	4,910	7,108	7,889	8,327	0,229
	Cv	0,463	0,423	0,410	0,407	-0,057
	b, м/с	5,498	7,984	8,887	9,378	0,232
	c	2,181	2,449	2,548	2,572	0,073
	P, кВт	480,3	942,6	1152,2	1259,5	0,420

5 Розраховані середні сезонні значення швидкості вітру $\bar{V}_0$ (м/с), коефіцієнта варіації Cv_0 та середні сезонні значення метеопараметрів: температури повітря T_0 (°C) і атмосферного тиску p_0 (Па) на висоті розташування флюгера $z_0=10$ м в порівнянні до значень показника m для виробки вітротурбіни наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Середні значення показника m для наведеної потужності вітротурбіни в залежності від середніх сезонних значень швидкості вітру, коефіцієнта варіації та метеопараметрів за даними метеопосту "Іванівка"

Сезон	m	$\bar{V}_0$, м/с	Cv_0	p_0 , Па	T_0 , °C
1. Весна	0,410	4,73	0,352	1009,1	12,1
2. Літо	0,582	4,04	0,322	1017,0	11,2
3. Осінь	0,436	4,85	0,332	1009,1	24,6
4. Зима	0,420	4,91	0,463	1014,2	-1,1

10 Дані таблиці 3 свідчать про те, що значення показника ступеневої моделі m для оцінки наведеної потужності вітротурбіни суттєво змінюється від сезону до сезону. Виникає задача побудувати регресійну модель для залежності m від основних параметрів, які є характерними для кожного сезону. Оскільки основних параметрів розподілу швидкості вітру два ($\bar{V}_0$ і Cv_0), основних метеопараметрів також два ($p_{сер.0}$ і $T_{сер.0}$), а сезонних значень показника m усього чотири, то існує проблема відбору найбільш інформативних пояснювальних змінних в рівнянні регресії. Для розв'язання проблеми відбору за даними таблиці 3 була розрахована кореляційна матриця, яка наведена в таблиці 4.

15

Таблиця 4

Кореляційна матриця

	m	$\bar{V}_0$	Cv_0	p_0	T_0
m	1				
$\bar{V}_0$	-0,960	1			
Cv_0	-0,492	0,564	1		
P_0	0,769	-0,686	0,177	1	
T_0	0,048	-0,033	-0,813	-0,564	1

20 Кореляційна матриця показує, що між показником ступеневої моделі m та середньою швидкістю вітру існує дуже сильний від'ємний кореляційний зв'язок (-0,960), при цьому сильний додатний зв'язок присутній між показником m та атмосферним тиском (0,769). Тому лише ці два

параметри залишили як пояснюючі змінні в рівнянні лінійної регресії (відомо, що чим менше параметрів в рівнянні регресії - тим воно більш значуще).

Далі застосували інструмент "Регресія" з пакету "Аналіз даних" MS Excel-2010 та одержали наступне рівняння лінійної множинної регресії:

$$m = -0,18475 \cdot \bar{V}_0 + 0,001302 \cdot p_0. \quad (8)$$

Це рівняння має дуже високий коефіцієнт детермінації (0,999), воно є значущим в цілому за Фішером ($p < 0,05$), його коефіцієнти є значущими за Стьюдентом ($p < 0,05$). Тобто рівняння регресії є якісним. Рівняння (8) свідчить про те, що зі збільшенням середньої швидкості вітру на 1 м/с показник m зменшується приблизно на 0,185; збільшення атмосферного тиску на 1 Па приводить до збільшення показника m приблизно на 0,001.

$$P(z) = P_0(z_0) \cdot \left(\frac{z}{z_0} \right)^m$$

У таблиці 5 передбачення ступеневої моделі для потужності турбіни урахуванням рівняння регресії (8) для показника m порівнюються з результатами точних розрахунків наведеної потужності вітротурбіни FL 2500-100 за даними метеопоста "Іванівка" (таблиця 2).

Таблиця 5

Залежність наведеної потужності вітротурбіни P (у кВт) від висоти

ОСІНЬ				
Висота, м	Розраховано	Передбачено	Залишок	Помилка, %
10	216,3	216,3	0,0	0,00
50	551,1	547,5	3,6	0,66
80	714,1	718,0	-3,9	-0,55
100	836,1	816,7	19,4	2,32
ВЕСНА				
Висота, м	Розраховано	Передбачено	Залишок	Помилка, %
10	388,4	388,4	0,0	0,00
50	752,6	787,3	-34,7	-4,61
80	913,0	967,7	-54,7	-6,00
100	1000,6	1067,3	-66,6	-6,66
ЛІТО				
Висота, м	Розраховано	Передбачено	Залишок	Помилка, %
10	346,8	346,8	0,0	0,00
50	700,6	679,6	21,0	3,00
80	857,3	827,1	30,3	3,52
100	947,6	908,0	39,6	4,18
ЗИМА				
Висота, м	Розраховано	Передбачено	Залишок	Помилка, %
10	480,3	480,3	0,0	0,00
50	942,6	934,0	8,6	0,92
80	1152,2	1134,1	18,1	1,57
100	1259,5	1243,7	15,8	1,26

Дані таблиці 5 свідчать про те, що очікувана максимальна відносна помилка рівняння ступеневої моделі для оцінки потужності вітротурбіни в порівнянні з результатами точних розрахунків не перевищує 7 %.

Приклади конкретної реалізації.

В усіх наведених прикладах оцінювали наведену потужність вітротурбіни типу FL 2500-100; при цьому вважали, що флюгер розміщують на європейському стандарті висоти $z_0 = 10$ м, та на тій ж самій висоті розташовують барометр.

Приклад 1. Весна. Протягом місяця були виміряні наступні середні значення: $\bar{V}_0 = 4,8$ м/с; $C_{V0} = 0,350$; $p_0 = 1010$ Па. Згідно з формулою (6) за значенням C_{V0} обчислили значення параметра

$$b = \frac{\bar{V}_0 \cdot c}{\Gamma\left(\frac{1}{c}\right)}$$

моделі Вейбулла-Гніденко $c=3,13$ та на підставі співвідношення таблиць [4] знайшли значення параметра $b=5,36$. Нормовану потужність турбіни на висоті розташування флюгера обчислили на підставі формули (8): $P_0(z_0)=287,4$ кВт. Показник m

ступеневої моделі обчислили згідно з рівнянням регресії: $m=-0,18475 \cdot \bar{V}_0 + 0,001302 \cdot p_0 = -0,18475 \cdot 4,8 + 0,001302 \cdot 1010 = 0,426$. Підставляючи значення $P_0(z_0)=287,4$ кВт та $m=0,426$ до формули ступеневої моделі, маємо наступну формулу для оцінювання нормованої потужності вітротурбіни $P_0(z) = 287,4 \cdot \left(\frac{L_z}{z_0}\right)^{0,426}$ у кВт від висоти z розташування осі вітроколеса:

, де висота z вимірюється в метрах. На фіг. 3 наведено відповідний

розподіл.

10 Приклад 2. Літо. Протягом місяця були виміряні наступні середні значення: $\bar{V}_0=5,0$ м/с; $C_{v0}=0,300$; $p_0=1020$ Па. Згідно з формулою (6) за значенням C_{v0} обчислили значення параметра моделі Вейбулла-Гніденко $c=3,79$ та на підставі співвідношення

таблиць [4] знайшли значення параметра $b=6,52$. Нормовану потужність турбіни на висоті розташування флюгера обчислили на підставі формули (8): $P_0(z_0)=524,3$ кВт. Показник m

15 ступеневої моделі обчислили згідно з рівнянням регресії: $m=-0,18475 \cdot \bar{V}_0 + 0,001302 \cdot p_0 = -0,18475 \cdot 5,0 + 0,001302 \cdot 1020 = 0,236$. Підставляючи значення $P_0(z_0)=524,3$ кВт та $m=0,236$ до формули ступеневої моделі, маємо наступну формулу для оцінювання нормованої потужності вітротурбіни $P_0(z) = 524,3 \cdot \left(\frac{L_z}{z_0}\right)^{0,236}$ у кВт від висоти z розташування осі вітроколеса:

, де висота z вимірюється в метрах. На фіг. 3 наведено відповідний

20 розподіл.

Приклад 3. Осінь. Протягом місяця були виміряні наступні середні значення: $\bar{V}_0=4,0$ м/с; $C_{v0}=0,320$; $p_0=1005$ Па. Згідно з формулою (6) за значенням C_{v0} обчислили значення параметра моделі Вейбулла-Гніденко $c=3,51$ та на підставі співвідношення

таблиць [4] знайшли значення параметра $b=4,44$. Нормовану потужність турбіни на висоті розташування флюгера обчислили на підставі формули (8): $P_0(z_0)=134,7$ кВт. Показник m

25 ступеневої моделі обчислили згідно з рівнянням регресії: $m=-0,18475 \cdot \bar{V}_0 + 0,001302 \cdot p_0 = -0,18475 \cdot 4,0 + 0,001302 \cdot 1005 = 0,568$. Підставляючи значення $P_0(z_0)=134,7$ кВт та $m=0,568$ до формули ступеневої моделі, маємо наступну формулу для оцінювання нормованої потужності вітротурбіни $P_0(z) = 134,7 \cdot \left(\frac{L_z}{z_0}\right)^{0,568}$ у кВт від висоти z розташування осі вітроколеса:

$$P_0(z) = 134,7 \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)^{0,568}$$

30 розподіл.

Приклад 4. Зима. Протягом місяця були виміряні наступні середні значення: $\bar{V}_0=5,0$ м/с; $C_{v0}=0,450$; $p_0=1015$ Па. Згідно з формулою (6) за значенням C_{v0} обчислили значення параметра моделі Вейбулла-Гніденко $c=2,27$ та на підставі співвідношення

35 таблиць [4] знайшли значення параметра $b=5,64$. Нормовану потужність турбіни на висоті

розташування флюгера обчислили на підставі формули (8): $P_0(z_0)=406,4$ кВт. Показник m ступеневої моделі обчислили згідно з рівнянням регресії: $m=-0,18475 \cdot \bar{V}_0 + 0,001302 \cdot \rho_0 = -0,18475 \cdot 5,0 + 0,001302 \cdot 1015 = 0,396$. Підставляючи значення $P_0(z_0)=406,4$ кВт та $m=0,396$ до формули ступеневої моделі, маємо наступну формулу для оцінювання нормованої потужності вітротурбіни FL 2500-100 у кВт від висоти z розташування осі вітроколеса:

$$P_0(z) = 406,4 \cdot \left(\frac{z}{z_0} \right)^{0,396}$$

, де висота z вимірюється в метрах. На фіг. 3 наведено відповідний розподіл.

Таким чином, запропонований спосіб оцінювання виробітку вітрової електричної турбіни дозволяє:

1. За результатами вимірювань лише середніх величин швидкості вітру та атмосферного тиску на висоті стандартного флюгера встановлювати значення показника ступеневої моделі m для нормованої потужності вітротурбіни з абсолютною помилкою до 7 % незалежно від сезону року.
 2. З урахуванням обчисленої нормованої потужності вітротурбіни на висоті стандартного флюгера та одержаного значення показника ступеневої моделі m розрахувати залежність потужності вітротурбіни на будь-якій реальній висоті розташування осі вітроколеса:
 3. За своєю простотою проводити оцінки швидко і багаторазово на невеликому обмеженому майданчику.
 4. Для реалізації способу використовувати лише стандартне недороге обладнання.
- Джерела інформації:
1. Рыхлов А.Б. Ветроэнергетический потенциал на различных высотах приземного слоя атмосферы на юго-востоке европейской территории России / А.Б. Рыхлов // Известия Саратовского университета, 2014. - Т. 14. Сер. Науки о Земле, вып. 1. - С. 30-37.
 2. Васько П.Ф. Определение технических показателей эффективности использования ветроэнергетических агрегатов в Украине / П.Ф. Васько, А.А. Брыль, П.П. Пекур // Энергетика и электрификация, 1995. - № 2. - С. 48-51.
 3. Кравчишин В.С. Моделювання енергетичного потенціалу вітрової електричної станції / В.С. Кравчишин, М.О. Медиковський, М.О. Галушак // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Сер.: Інформаційні системи та мережі. - 2016. - № 854. - С. 80-87.
 4. Справочник по специальным функциям / под ред. М. Абрамовича и М. Стиган // М.: Наука, 1979. - 830 с.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Спосіб оцінювання виробітку вітрової електричної турбіни, що полягає у визначенні середньої швидкості вітру $\bar{V}_0$ на фіксованій висоті z_0 , де розташований стандартний флюгер, а також середніх значень метеопараметрів на тій ж самій висоті, який **відрізняється** тим, що з диференціального розподілу швидкості вітру визначають коефіцієнт варіації C_V , а за його значенням та значенням $\bar{V}_0$ обчислюють параметри диференційного розподілу Вейбулла-Гніденко; потім моделюють потужнісну характеристику вітротурбіни у вигляді поліному ступеня не нижче третього за швидкістю вітру; потужність вітротурбіни P на різних висотах обчислюють як згортку розподілу Вейбулла та потужнісної характеристики вітротурбіни; далі розраховують показник ступеневої залежності m потужності турбіни від висоти розташування осі вітроколеса згідно з формулою:

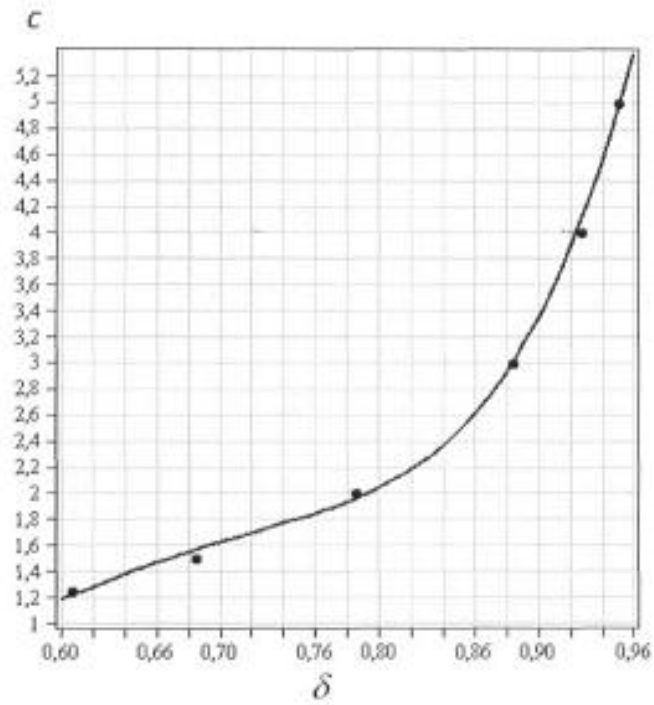
$$m = -0,18475 \cdot \bar{V}_0 + 0,001302 \cdot \rho_0,$$

де ρ_0 - середній атмосферний тиск на висоті розташування флюгера під час вимірювань;

остаточно передбачувану залежність потужності вітротурбіни $P(z)$ від висоти z розташування осі вітроколеса визначають згідно з формулою:

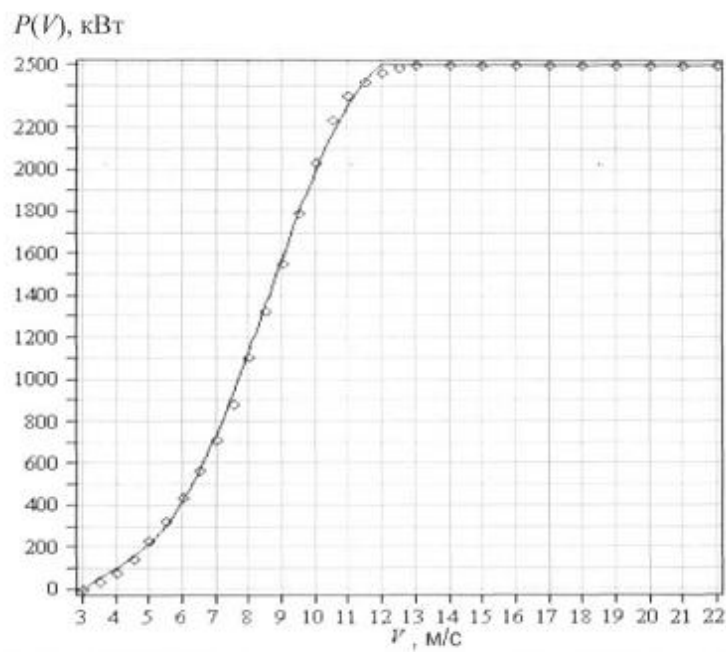
$$P(z) = P_0 \cdot \left(\frac{z}{z_0} \right)^m,$$

де P_0 - умовна потужність турбіни на висоті флюгера.

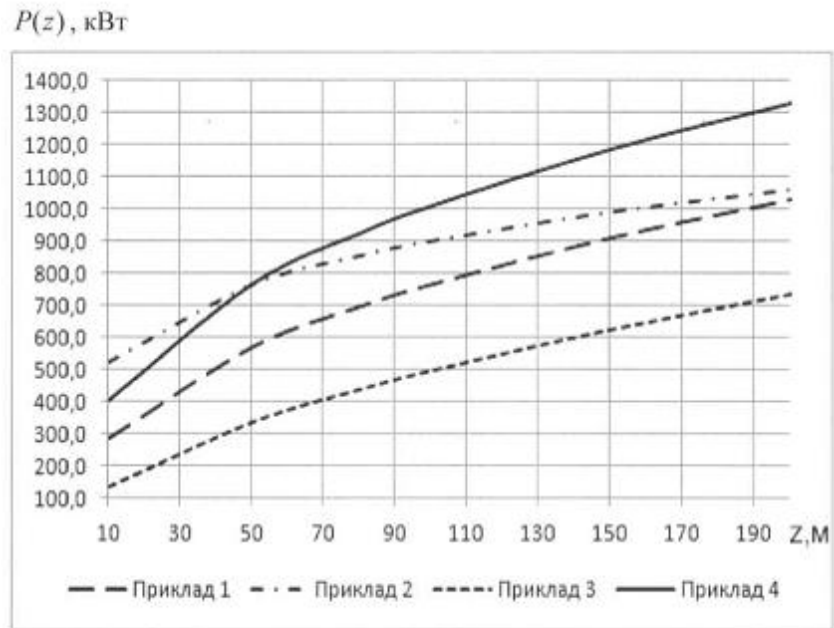


Інтерполяційна крива (6) залежності параметру c моделі Вейбулла від параметру $\delta = \frac{1}{1 + Cv^2}$ (точки – точні значення c).

Фіг. 1



Фіг. 2



Фіг. 3

Комп'ютерна верстка О. Рябко

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601