

УДК 621.317.77

Квашук Д.М., к.е.н.,
orcid.org/0000-0002-4591-8881

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРІВ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Національний авіаційний університет

dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua

Вступ

Зважаючи на можливості для отримання великої кількості екологічно чистої електроенергії, шляхи до вдосконалення засобів оптимізації багатьох альтернативних видів енергетики постійно розширюються. Не виключенням залишається і вітрова енергетика. Зважаючи на те, що вітрові електростанції перестали бути екзотикою, спостерігаються тенденції до збільшення кількості вітряків. Це, у свою чергу, вимагає визначити такі межі продуктивності, при яких перетворення енергії вітру в електричну енергію буде максимальним. Такі потреби стосуються і інших аспектів, як наприклад: вартість вітрових турбін, здатність адаптуватися до мінливих кліматичних умов, енергоефективність, мобільність, кількість, тощо. В деяких випадках немає сенсу додавати нові турбіни на наявну ділянку землі, оскільки в певний момент, вони починають взаємно знищувати позитивний ефект. В такому випадку, кожна турбіна виробляє менше енергії у порівнянні, якщо б вона працювала окремо.

Усе це, та багато інших факторів пов'язаних із оптимізацією роботи вітрових електростанцій потребує нових підходів, як до вітрової енергетики загалом, так і до інформаційно-вимірювальних систем зокрема.

Для того, щоб забезпечити усі турбіни вільним доступом до високошвидкісного повітряного потоку, з якого можна зробити більшу кількість електроенергії, потрібно оптимізувати їх кількість та тип розташування у відповідності до ландшафту та по відношення до самих турбін.

В свою чергу, є потреба в поєднанні вимірювальних та обчислювальних засобів, збільшення точності вимірювань та

прогнозування подальших змін багатьох інформаційних параметрів. Це дозволить значною мірою збільшити ефективність роботи вітрових електростанцій.

Аналіз досліджень та публікацій

Дослідження, які спрямовані на оптимізацію роботи вітрових електростанцій мають у своєму складі ряд методів основаних на штучних нейронних мережах, генетичних алгоритмах, засобах машинного навчання, оптимізаційних методах лінійного та не лінійного програмування [1-4]. Проте їх ефективність залежить від інформаційно – вимірювальних систем. Тому, для оптимізації вимірювання робочих характеристик вітрових генераторів в динаміці, потрібні комбіновані системи вимірювання мережевого типу. До таких можна віднести наступні [5,6]. Разом з тим, єдиних підходів до роботи таких мереж складно отримати враховуючи не однозначність умов розміщення електростанцій, та типу вітрових турбін.

Основними інформаційними параметрами для визначення робочих характеристик електрогенераторів вітрових турбін є: частота обертання; момент сили; потужність, напруга, струм та швидкість вітру, значна частина яких отримується через ряд високоточних перетворювачів для встановлення залежностей та відповідностей потрібним вимірювальним величинам. Так, потужність на валу ротора вітроустановки може бути визначена через наступний вираз [7]:

$$P_p = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3, \quad (1)$$

де: C_p – коефіцієнт використання енергії вітру; ρ – щільність повітря; S – площа поверхні ротора; V – швидкість потоку вітру.

Для отримання площі поверхні ротора представимо вираз (1) наступним чином:

$$S = \frac{2 \cdot P_p}{c_p \cdot \rho \cdot V^3}, \quad (2)$$

В свою чергу радіус ротора буде виражатися:

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (3)$$

Маючи радіус ротора, можна знайти частоту його обертання:

$$\omega_p = \frac{Z_H \cdot V}{R}, \quad (4)$$

де: $Z_H \cong 6 \div 7$ – коефіцієнт номінальної бистрохідності ротора.

Номінальна потужність генератора може бути описана як:

$$P = P_p \cdot \eta, \quad (5)$$

де: η – КПД від трансмісії ротора до генератора.

Номінальна частота може бути виражена наступним виразом:

$$\omega = \omega_p \cdot i_T, \quad (6)$$

де: i_T – відношення трансмісії ротора до генератора.

Важливим параметром під час вимірювання потужності електрогенератора вітрової електростанції є магнітний потік, який через одну обмотку змінюється по гармонічному закону [8]:

$$\Phi = \Phi_0 \sin \frac{n \cdot \omega \cdot t}{2}, \quad (7)$$

де: Φ_0 – максимальне значення магнітного потоку, яке може бути знайдено за формулою що виражається, як:

$$\Phi_0 = B_s \cdot S, \quad (8)$$

де B_s – усереднене за площею полюса значення магнітної індукції в зазорі; S – площа полюса магніту; n – число полюсів генератора; ω – кутова частота обертання генератора; t – поточний час.

Для поточного значення напруги однієї обмотки можна отримати наступний вираз [9]:

$$E_D = \frac{N \cdot B_s \cdot S \cdot n \cdot \omega}{2\sqrt{2}}, \quad (9)$$

де N – кількість витків обмотки.

В свою чергу електромагнітний момент генератора можна представити, як відношення потужності генератора до кутової частоти обертання:

$$M = \frac{P}{\omega}, \quad (10)$$

Загалом, існує багато підходів для визначення електромагнітного моменту. Так, враховуючи номінальний струм, кількість провідників в обмотках, лінійне навантаження, індуктивність, діаметр та довжину ротора, вітчизняні дослідники запропонували наступну модель [10]:

$$M_e = a_i \cdot (A \cdot B_\delta) \cdot \pi \cdot D_a^2 \cdot l_a, \quad (11)$$

де: $A = \frac{I_n \cdot N}{\pi \cdot D_a}$ – лінійне навантаження (А/м);

I_n – номінальний струм; N – число провідників в навантаженні; B_δ – індукція в робочому зазорі (Тл); $\pi \cdot D_a^2 \cdot l_a$ – довжина ротора (м); D_a – діаметр ротора (м).

Таким чином, із виразу (11) видно, що із збільшення частоти обертання, маса та габарити ротора та електрогенератора в цілому мають бути зменшеними. Існують і інші способи вимірювання робочих характеристик електрогенераторів вітрових турбін [11-13]. Разом з тим, є необхідність інтеграції вже існуючих моделей вимірювання в єдину інформаційну систему. У зв'язку з цим, останнім часом набули великого розвитку бездротові сенсорні мережі. Вони можуть складатися із безлічі мініатюрних вузлів, оснащених малопотужним приймачем, мікропроцесором і сенсором, а також пов'язати воедино глобальні комп'ютерні мережі та фізичний світ [14].

Загалом, можливість вирішення питань енергонезалежності країн, підприємств та окремих домогосподарств шляхом оптимізації вітряних електростанцій є вкрай актуальною.

Мета

Дослідити робочі характеристики електрогенераторів вітрових електростанцій шляхом моделювання перехідних процесів. Побудувати власну модель та провести її тестування з метою визначення ступеню випадкових відхилень вихідних параметрів. Провести апроксимацію отриманої кривої за даною моделлю. Дослідити її вхідні параметри, при яких робота електрогенератора буде найбільш ефективною.

Основна частина

З метою дослідження робочих характеристик електрогенераторів змодельовано мережу вітряних турбін, кожна з яких включає в себе сенсорний вузол для

вимірювання напруги, потужності, моменту сили та швидкості вітру, умовно розміщених на схилі пагорба розміром 1100 × 1100 м. (рис. 1). Кожен сенсорний вузол вимірює робочі характеристики вертикальних вітрових турбін.

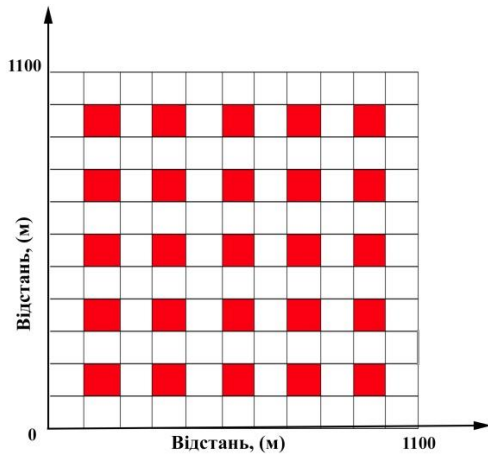


Рис. 1. Розміщення вітряних турбін на ділянці 1100 × 1100 м.

За умов нерівномірності вітрових потоків існує потреба у вимірюванні, як загальної потужності мережі вітрових турбін так і окремо кожної з них.

Такі параметри, як: напруга, потужність та струм мають між собою наступну залежність:

$$P = I \cdot U \cdot \cos \varphi, \quad (12)$$

де: I – струм; U – напруга; $\cos \varphi \cong 0,8 \div 0,85$ – коефіцієнт потужності.

Енергія потоку вітру визначається за наступним виразом:

$$N = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2}, \quad (13)$$

де: ρ – щільність повітря ($1,23 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$); S – площа ротора (м^2); V – швидкість вітру (м/с).

Щільність повітря залежить від тиску та температури і виражається у кілограмах на кубічний метр. Щільність сухого повітря при стандартній температурі тиску 760 мм ртутного стовпа становить 1.226 кг/м. Вітрова турбіна характеризується коефіцієнтом використання енергії вітру ξ , який визначається, як відношення механічної потужності на валу турбіни N_T до потужності вітрового потоку N :

$$\xi = \frac{N_T}{N}, \quad (14)$$

Проте реальний коефіцієнт використання енергії вітру завжди менше теоретичного за рахунок утворення вихорів, що сходять з кінців лопаток вітрової турбіни, профільних втрат, які викликаються тертям струменів повітря, втрат, що відбуваються внаслідок неповного використання всієї площі лопаток.

Швидкість вітрової турбіни характеризується, як відношення окружної швидкості кінця лопатки до швидкості вітру. Її можна розрахувати, якщо відомі розрахункове число оборотів при заданій швидкості вітру:

$$Z = \frac{\omega R}{V}, \quad (15)$$

де: ω – кутова швидкість обертання вітровадвигуна, рад/с; R – радіус лопатки вітрокола, м.

Електрична потужність, що розвивається вітровою турбіною, може бути визначена з виразу:

$$P_E = \pi \rho V^3 \frac{R}{2} \xi \eta, \text{ Вт} \quad (16)$$

де: η – КПД електромеханічного перетворення енергії; (0,7-0,85).

Виходячи із виразу (12), (13) та враховуючи, що на вході ми маємо енергію вітру, а на виході потужність, струм та напругу, дані вирази можна представити у вигляді рівняння, що дозволить виразити залежність між заданими параметрами:

$$\frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} = \frac{P}{I \cdot \cos \varphi}, \quad (17)$$

При поступальному збільшенні швидкості вітру, потужність вітрового потоку із виразу (13) представлено на рис.2.

Із кривої видно, що ефективність використання повітряних потоків починається із швидкості вітру 2 м/с.

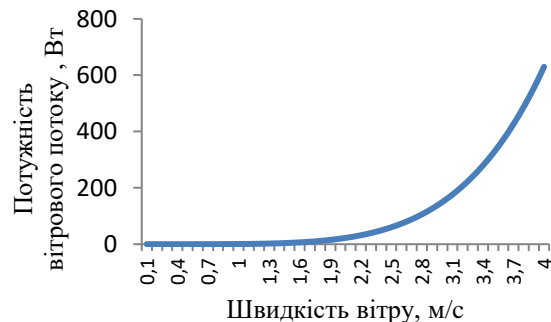


Рис. 2. Потужність повітряного потоку.

Враховуючи, що потужність вітрового потоку створює обертальний момент на валу електрогенератора, слід визначити цей момент. Так, враховуючи, що на кожен провідник якоря, який знаходиться в магнітному полі діє електромагнітна сила, її загальне значення можна представити за наступним виразом:

$$F_{мс} = B_{ср} \cdot l \cdot I = \frac{\Phi \cdot 2p}{\pi d l} l \frac{I_{я}}{2a} = \frac{p\Phi}{\pi da} I_{я}, \quad (18)$$

де: $B_{ср}$ – середнє значення магнітної індукції; d – діаметр якоря; l – довжина якоря; p – приведений радіус інерції; Φ – магнітний потік пари полюсів; $\Phi \cdot 2p$ – повний потік магніто-полюсної машини; a – число паралельних гілок обмотки; $I = \frac{I_{np}}{2a}$ – струм паралельної гілки; $I_{я}$ – струм якоря.

Момент кожного провідника обмотки можна представити виразом (19):

$$M_{np} = F_{np} \frac{d}{2} = \frac{\Phi p}{\pi da} \cdot \frac{d}{2} I_{я} = \frac{p\Phi}{2\pi a} I_{я}, \quad (19)$$

В такому випадку, повний електромагнітний момент буде мати наступний вигляд:

$$M = M_{np} \cdot N = \frac{p}{2\pi a} N \Phi I_{я} = c_M \Phi I_{я}, \quad (20)$$

де: $c_M = \frac{p}{2\pi a} N$ – постійна величина; N – число пар провідників обмотки якоря.

В процесі перетворення механічної енергії на електричну, електрична потужність пропорційно змінюється із механічною. Так, нехай F – сила, яка додається до якоря з метою обертання навколо осі, а v лінійна швидкість на зовнішній поверхні якоря. Тоді повна механічна потужність буде мати таку залежність:

$$P_M = Fv,$$

Підставивши це у вираз $F = \frac{2M}{d}$ та

$$v = \frac{\omega d}{2}, \text{ отримаємо:}$$

$$P_M = \frac{2M}{d} \omega \frac{d}{2} = M\omega, \quad (21)$$

де: ω – кутова швидкість;

Обертальний момент електрогенератора також можна отримати за наступним виразом:

$$M = \frac{pN}{60a} \frac{n\Phi I_{я}}{2\pi n} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_{я}, (N \cdot m) \quad (22)$$

де: p – число пар полюсів;

I в свою чергу механічна потужність:

$$P_M = \frac{p}{2\pi a} N \Phi I_{я} \frac{2\pi n}{60}, \quad (23)$$

Після того, як було отримано потужність вітрового потоку, розрахуємо вихідні параметри генератора, визначивши невідомі I та U рівняння (17) за умови, що опір котушок складає 10 Ом:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}, \quad (24)$$

де: $R = 10$ Ом – опір котушок генератора.

Результат, який характеризує залежність між потужністю, яка створюється потоком вітру та вихідними параметрами генератора у відповідності до виразу (17), в даній роботі побудований з урахуванням поступального збільшення потоку вітру, (рис.3).

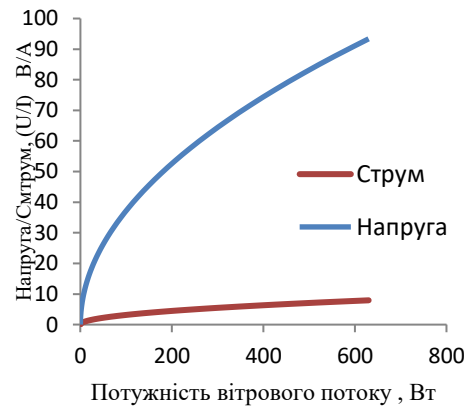


Рис. 3. Залежність вихідних параметрів електрогенератора та потужності вітрового потоку.

При поступальному збільшенні швидкості вітру, відповідно виразу (22) та залежність обертального моменту валу електрогенератора та напруги буде мати наступний вигляд (рис.4).

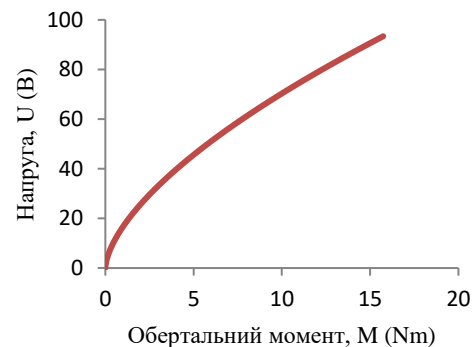


Рис. 4. Залежність напруги електрогенератора обертального моменту.

Для визначення загальних робочих характеристик вітрової електростанції, у відповідності до розташування вітряків (рис.1), параметр швидкості вітру було змодельовано із застосуванням генератора випадкових чисел. До моделі перетворення було включено формули (17) та (22).

Отримано загальні перехідні характеристики та визначено середнє значення вихідної напруги та струму.

Так, результат моделювання робочих характеристик 25 вітрових турбін показав суттєве відхилення отриманих показників, від середнього значення.

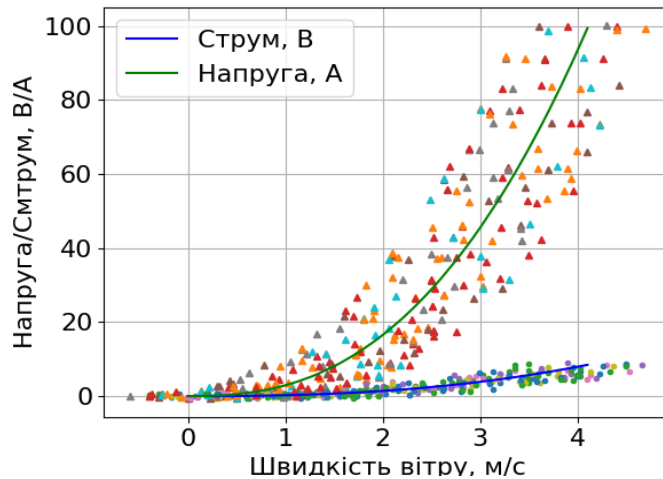


Рис. 5. Перехідні характеристики вітрових турбін

Середньоквадратичне відхилення напруги склало – 28.8, струму – 2.4.

Зважаючи на значні відхилення, вимірювання загальних показників отримати досить складно, тому була проведена апроксимація отриманої функції, що дозволило зменшити середньоквадратичне

відхилення напруги до 12.3, струму до 1.2. (рис.5).

Узагальнені характеристики обертального моменту вказують на менше відхилення від середнього значення. Так середньо квадратичне відхилення потужності вітрового потоку склало 5.9. (рис.6).

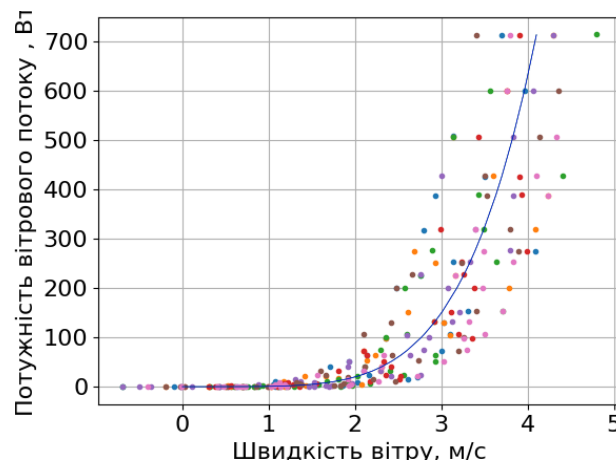


Рис. 6. Залежність швидкості вітру від потужності вітрового потоку

Висновок

Отримана перехідна характеристика електрогенераторів вітрових турбін показала, що для визначення сукупної вихідної напруги вітрової електростанції слід застосовувати методи компенсації випадкових відхилень.

Моделювання вихідних параметрів електрогенератора вітрової турбіни із застосуванням виразу (17) дозволило встановити, що достатню ефективність використання турбіни можна отримати при швидкості вітру не менше ніж 2 м/с.

Література

1. WANG, Yinfeng & Lu, Chao & Zhu, Lipeng & ZHANG, Guoli & LI, Xiu & CHEN, Ying. (2016). Comprehensive modeling and parameter identification of wind farms based on wide-area measurement systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. – Vol. 4. – P. 383-393.
2. Zhang, Xinran. (2015). Ambient signal based load model parameter identification using optimization method. – P. 1-5.
3. Chowdhury M.A., Shen W.X., Hosseinzadeh N. et al (2015). Transient stability of power system integrated with doubly fed induction generator wind farms. *IET Renew Power Gener.* – №9 (2). P. 184-194.
4. Shi L.B., Sun S.M., Yao L.Z. et al (2014) Effects of wind generation intermittency and volatility on power system transient stability. *IET Renew Power Gener.* – №8 (5). P. 509-521.
5. Лихтциндер Б.Я., Киричек Р.В., Голубничая Е.Ю., Федотов Е.Д., Кочуров А.А. Беспроводные сенсорные сети //Научно-техническое издательство "Горячая линия-Телеком". – М.: 2020. – 236 с.
6. Еркин А. Разработка распределенных систем контроля датчиков на основе защищенных низко потребляющих беспроводных ZigBee-сетей на базе микроконтроллеров фирмы Jennic / Беспроводные устройства CHIP NEWS, 2010. – №1. – С. 1-9.
7. Перминов Ю.Н. Алгоритм расчета синхронных генераторов торцевой конструкции с двумя магнитными системами, расположенными по торцам статора, для ветроэнергетических установок / Ю.Н. Перминов, В.П. Коханевич, Т.В. Зинченко // *Відновлювана енергетика*. – 2016. – № 2. – С. 45-49.
8. Кацман М.М. Электрические машины: Учеб. для студентов сред. проф. учебных заведений. 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк.; Издательский центр «Академия», 2001. – 463 с.
9. Олейников А.М., Матвеев Ю.В., Канов Л.Н., Зарицкая Е.И. Математическая модель автономной безредукторной ветроэлектрической установки на генераторе с постоянными магнитами. *Электротехника і електроенергетика*, 2010. – №2. – С. 62-67.
10. Permyunov, Y. & Monakhov, E. (2019). Сравнение вариантов конструкций синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для ветроустановок. *Vidnovluvana energetika*. – С. 54-60.
11. Кацман М.М. Электрические машины: Учеб. для студентов сред. проф. учебных заведений 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк.; Издательский центр «Академия», 2001. – 463 с.
12. Schlemmer, E. Damping of synchronous machines – analytical estimations versus finite element results / E. Schlemmer // ICSEP. – 2009. – P. 751-754.
13. Fishov, A. Stability Monitoring and Control of Generation Based on the Synchronized Measurements in Nodes of Its Connection / A. Fishov, M. Shiller, A. Dekhterev [et al.] // *Journal of Energy and Power Engineering*. – 2015. – Vol. 9. – P. 59-67.
14. Aghdam, Shahin Mahdizadeh; Khansari, Mohammad; Rabiee, Hamid R; Salehi, Mostafa (2014). "WCCP: A congestion control protocol for wireless multimedia communication in sensor networks". *Ad Hoc Networks*. – №13. – P. 516-534.

Квашук Д.М.

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРІВ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

У статті проведено дослідження робочих характеристики вітрових електрогенераторів. Розглянуто перехідні процеси, пов'язані із ефективністю їх роботи на вітрових електростанціях. Досліджено модель перетворення вхідних параметрів, яка включає в

себе швидкість вітру, площу лопаток турбіни, щільність повітря, потужність вітрового потоку на вході та напругу, струм і потужність на виході. В результаті її апробації встановлено, що коефіцієнт використання енергії вітру завжди менше теоретичного за рахунок утворення вихорів, що сходять з кінців лопаток вітрової турбіни, профільних втрат, які викликаються тертям струменів повітря, втрат, що відбуваються внаслідок неповного використання всієї площі лопаток. Досліджено модель обертового моменту електрогенератора з урахуванням електромагнітних та фізичних характеристик, що дозволило визначити залежність механічної потужності та електричних параметрів генератора. Побудовано модель вітряної електростанції до складу якої входить 25 турбін, кожна з яких включає в себе сенсорний вузол для вимірювання напруги, потужності, моменту сили та швидкості вітру, умовно розміщених на схилі пагорба розміром 1100 × 1100 м. Отримані в роботі математичні моделі перехідних характеристик вітряних електрогенераторів дозволили визначити узагальнені вихідні параметри, зокрема середнє значення напруги, струму та обертового моменту в залежності від швидкості вітру, а також середньоквадратичне відхилення цих величин.

Ключові слова: вітрова електростанція, обертовий момент, електрогенератор, потужність, струм, вимірювання.

Kvashuk D.M.

RESEARCH OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF WIND POWER GENERATORS

The article studies the performance of wind turbines. Transients related to the efficiency of wind power generators are considered. The model of input parameters adjustment is investigated, which includes wind speed, turbine blade area, air strength, inlet wind power output and voltage, current and output power. As a result of its testing, it was found that the coefficient of wind energy utilization is always less than theoretical due to the formation of vortices coming from the ends of the wind turbine blades, profile losses caused by friction of air jets, losses due to incomplete use of the entire blade area. The model of the torque of the electric generator is investigated taking into account the electromagnetic and physical characteristics, which allowed to determine the dependence of the mechanical power and electrical parameters of the generator. A model of a wind power plant was built, which includes 25 turbines, each of which includes a sensor unit for measuring voltage, power, torque and wind speed, conditionally placed on a hillside measuring 1100 × 1100 m. generators allowed to determine the generalized output parameters, in particular the average value of voltage, current and torque depending on wind speed, as well as the standard deviation of these values.

Key words: wind power plant, torque, generator, power, current, measurement.