

УДК 621.317.77

DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.3.5>

МЕРЕЖЕВА АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРІВ ВІТРОВИХ ТУРБІН

Квасніков В. П. – доктор технічних наук, професор,
заслужений метролог України, завідувач кафедри комп'ютеризованих
електротехнічних систем та технологій
Національного авіаційного університету
ORCID ID: 0000-0002-6525-9721

Квашук Д. М. – кандидат економічних наук, доцент, докторант кафедри
комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій
Національного авіаційного університету
ORCID ID: 0000-0002-4591-8881

Сомчинська К. О. – студентка кафедри бізнес-аналітики та цифрової економіки
Національного авіаційного університету
ORCID ID: 0000-0003-2176-3381

Стаття присвячена дослідженню інформаційних технологій в галузі вимірювальної техніки та автоматизації. Розглядається проблема контролю робочих характеристик вітрових турбін малої потужності з метою формування пропозицій щодо створення інформаційно-вимірювальної системи, в умовах обмеженості енергетичних ресурсів. У статті проведено дослідження мережових вимірювальних засобів. Досліджено можливості створення вимірювальної мережі для вітрових електрогенераторів малої потужності. Досліджено міжнародний та вітчизняний досвід моделювання робочих характеристик вітрових генераторів. А саме, впливу перешкод для вимірювальних каналів та залежностей обертового моменту від ряду фізичних величин. Розглянуто застосування первинних датчиків автоматизованих систем управління на вітрових електростанціях. Досліджено методи вимірювання робочих характеристик електрогенераторів, що застосовуються на вітрових електростанціях. Запропоновано модель автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи для контролю та управління роботою вітрових електрогенераторів малої потужності, мережевого типу. Запропоновано рекомендації, щодо побудови автоматизованої системи управління потужністю вітрової турбіни. На основі досліджених методів та моделей вимірювання параметрів вітрових електрогенераторів створено програмний код, який дозволяє візуалізувати результати моделювання, що дозволило отримати залежність обертового моменту валу електрогенератора від швидкості вітру, а також відобразити динаміку зміни вихідної напруги та визначити номінальний режим роботи, як окремого електрогенератора, так і мережі електрогенераторів. Сформовано рекомендації, щодо застосування сенсорної мережі для вітрової електростанції. Визначено перспективні напрямки розвитку вимірювальних мереж для вітрових електростанцій.

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

Kvasnikov V. P., Kvashuk D. M., Somchinska C. O. Network automated system for measuring the operating characteristics of wind turbine generators

The article is devoted to the study of information technology in the field of measuring technology and automation. The problem of control of working characteristics of wind turbines of small power for the purpose of formation of offers on creation of information and measuring system, in the conditions of limited energy resources is considered.

The research of network measuring means is carried out in the article. Possibilities of creation of a measuring network for wind power generators of low power are investigated. The international and domestic experience of modeling of working characteristics of wind generators is investigated. Namely, the influence of interference for measuring channels and the dependence of torque on a number of physical quantities. The application of primary sensors of automated control systems at wind power plants is considered. Methods for measuring the operating characteristics of electric generators used in wind power plants have been studied. The model of the automated information-measuring system for control and management of work of wind electric generators of small power, network type is offered. Recommendations for the construction of an automated wind turbine power management system are offered. Based on the studied methods and models of measuring the parameters of wind turbines, a program code was created that allows to visualize the simulation results, which allowed to obtain the dependence of the generator shaft torque on wind speed, as well as to display the dynamics of output voltage and determine the nominal mode of operation. and networks of electric generators. Recommendations for the use of a sensor network for a wind farm have been developed. Perspective directions of development of measuring networks for wind power plants are determined.

Key words: *electric generator; wind power plant, current, measurements, torque, voltage.*

Вступ. Сьогодні існує потреба у покращенні енергетичного потенціалу світу за рахунок альтернативних джерел енергії. Найбільш енерго-ефективною, серед вже існуючих енергетичних сфер, можна вважати вітрову енергетику. Тому покращення цієї сфери є однією із найбільш актуальних задач світової політики, економіки, науки і техніки багатьох країн світу. Разом з тим, на перешкоді стоїть багато факторів впливу на ці процеси. Зокрема, з технічної сторони, це визначення населених пунктів, найбільш оптимальних для розміщення вітрових турбін, оптимізація вимірювальних каналів для збільшення точності контролю за роботою вітрових станцій, покращення роботи автоматизованих систем регулювання навантаженням, тощо.

Крім того, переважна більшість громадян, які проживають за межею бідності в різних країнах світу, через недоступність електроенергії, потребують власних та автономних джерел живлення. Тому існує необхідність для таких категорій населення побудови автономних джерел електропостачання. Враховуючи що, недоступність централізованого електропостачання в деяких регіонах світу, при наявності власних джерел живлення у громадян, потужності яких не вистачає для власних потреб, такі джерела можна об'єднувати в мережу з розподіленим графіком користування. Це дозволить використовувати малозабезпеченому населенню малопотужні вітрові генератори, сонячні панелі, та інші джерела живлення, об'єднуючи їх в мережу. Тому, для того, щоб поєднати такі джерела живлення, потрібно як апаратне, так і програмне забезпечення для управління та контролю цією системою.

Контроль за роботою вітрових електростанцій здійснюється за допомогою уніфікованих рішень, які включають в себе набір програмних та технічних засобів, проте вони розраховані в основному на обслуговування великих електростанцій, а їх вартість для малозабезпечених громадян не є доступною.

Таким, чином для побудови мережевої системи вітрових електрогенераторів, потрібно контролювати значну кількість інформаційних параметрів, зокрема стан вітрових турбін та їх продуктивність. Найважливішим таким параметром виступає контроль за переміщенням валу електрогенератора, його обертального моменту та швидкості обертання, оскільки при перевищеннях допустимих режимів роботи, виникає підвищене зношування підшипників, перенавантаження на електроніку, збільшення руйнівних вібрацій, що значно зменшує строк експлуатації вітрової турбіни, а в деяких випадках і до аварійних ситуацій.

Усе це, та багато інших потреб вимагають створення автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи вітрових електрогенераторів мережевого типу, що

дозволить малозабезпеченим громадянам, за відсутності постійного електропостачання поєднувати власні вітрові генератори та навіть інші джерела живлення малої потужності в загальну мережу, управління якою може здійснюватись в автоматизованому режимі.

Постановка проблеми. Незначна кількість напрацювань, щодо створення мережових вимірювальних систем, а також систем управління вітровими електростанціями стримує розвиток бюджетних електричних мереж малої потужності для потреб власних домогосподарств.

Аналіз літератури. Останнім часом автоматизовані системи, які застосовуються для управління вітровими електростанціями почали інтеграцію в єдині вимірювальні мережі, що дозволяють ефективно отримувати велику кількість інформаційних параметрів. Така інтеграція дозволяє збільшити точність вимірювань та створити умови для подальшого прогнозування окремих видів похибок. Тому, в сучасних умовах, широкої популярності набув термін «бездротова сенсорна мережа» що розглядається, як само-організована, стійка до відмов окремих елементів мережа мініатюрних датчиків, обмін інформації між якими відбувається за рахунок бездротового зв'язку [1].

Вузли сенсорної мережі є автономними, що дозволяє забезпечити належну стійкість до зміни топології та зміни умов поширення результатів вимірювань. Так, первинний елемент виступає і як вимірювальний перетворювач, а також, як пристрій для обробки первинного сигналу, з власним інтерфейсом для передачі даних в мережу.

Переважна більшість сенсорних мереж є бездротовими, що дозволяє значно спростити їх експлуатацію, особливо в умовах, коли кожна вітрова турбіна потребує окремих рішень щодо автономності вимірювальних засобів, їх енергонезалежності та уніфікованості для використання.

Враховуючи особливості роботи вітряних електростанцій, сигнали від сенсорів, які знаходяться на вітрових турбінах, як правило передаються безпроводним каналом та мають перешкоди. Долідження такого впливу знайшло своє відображення в роботі [2], де описано сумарний вплив таких перешкод у вигляді логарифмічної моделі:

$$PL(d) = PL(d_0) + n \cdot 10 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}, \quad (1)$$

де: PL – відстань затухання сигналу; d – відстань від передавача до приймача; d_0 – деяка відстань, на якій розраховується опорне значення затухання; n – ступінь втрат у каналі зв'язку; X_{σ} – Гаусівська випадкова величина з нульовим математичним очікуванням та середньоквадратичним відхиленням σ , що описує неоднорідності середовища поширення сигналу.

Вимірювальні сенсори, які використовують для вітрових генераторів виконують наступні функції: контроль рівня вібрації для забезпечення захисту від аварійних ситуацій; моніторинг температури, тиску та механічних напруг. Останній параметр заслуговує на особливу увагу, оскільки він є ключовим в процесі визначення вихідної потужності електрогенератора та оцінювання навантаження. Так, загальноприйнята формула для визначення обертового моменту в залежності від швидкості вітру має на наступний вираз [3]:

$$M = \frac{C_m}{2} \rho V^2 r, \quad (2)$$

де: C_m – коефіцієнт обертового моменту; ρ – щільність повітря; 2 кг/м^3 ; V – швидкість вітру, м/с; S – площа лопатки; r – радіус вітроколеса.

C_m – визначається при максимальному коефіцієнті використання енергії вітру та швидкохідності Z , [3]:

$$Z = \frac{V_{lin}}{V_{vitr}} = \frac{\omega \cdot r}{V}, \quad (3)$$

де: V_{lin} – лінійна швидкість обертання, м/с; V_{vitr} – швидкість вітру, м/с; ω – кутова швидкість обертання валу.

Вихідна напруга може бути розрахована за наступною формулою [3]:

$$U = \frac{P}{I \cdot \cos \varphi}, \quad (4)$$

де: I – струм; $\cos \varphi \cong 0,8 \div 0,85$ – коефіцієнт потужності, P – потужність вітрового потоку.

В роботі [4], проведено моделювання впливу обертального моменту на роботу електрогенератора вітрової турбіни, в основі якої закладено наступне рівняння:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_d - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d, \\ \frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_d + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_q - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q}, \\ T_e = 1,5 p [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \\ \frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_r - T_m), \\ \frac{d}{dt} \theta = \omega_r, \end{cases}, \quad (5)$$

де: L_q, L_d – індуктивності статора по осях q і d ; R – опір обмотки статора; i_d, i_q – проекції струму статора на осі q та d ; u_d, u_q – проекції напруги статора на осі q та d ; ω_r – кутова швидкість обертання ротора; λ – магнітний потік, зчеплений зі обмоткою статора; p – кількість пар полюсів; T_e – електромагнітний момент; J – сумарний момент інерції ротора та навантаження; F – коефіцієнт тертя; θ – кут положення ротора; T_m – момент опору.

Оскільки генератор видає змінний струм по фазі, частоті та амплітуді, який складно використати для потреб споживача, він проходить через трьохфазний випрямний міст. Вимірювання вихідної напруги здійснюється за допомогою вольтметра, частота обертання ротора вимірюється з використанням акселерометрів, які призначені для вимірювання прискорення та частоти обертання. З метою моніторингу швидкості обертання валу електрогенератора використовують акселерометри. У вітрогенераторах вони використовуються для виявлення вібрації в підшипниках, а також в інших компонентах, що обертаються. Дані про вібрації необхідні для поточного моніторингу, прогнозування та запобігання можливим аваріям. Для визначення змін ефективності роботи генератора використовують датчики швидкості вітру. Важливим параметром є і температура, оскільки вал та інші механізми змінюють свою пружність в залежності від зміни температури. Для узгодження таких змін використовують інтелектуальну корекцію похибок.

Розглянуті параметри можуть бути отримані з використанням сенсорних мереж. Наприклад в роботі [5] запропоновано метод кластеризації бездротової сенсорної мережі з додаванням алгоритму рою бджіл, який дозволяє створювати мережі, незалежні від точки управління такою мережею. Загалом, існує більше 200 різних алгоритмів самоорганізації. сенсорних мереж, класифікація яких представлена

в роботі [6]. Тому, для побудови сенсорної мережі, яка може бути застосована для вітрових електрогенераторів малої потужності слід провести моделювання такої системи для визначення її номінальних режимів, аварійних станів та енергоефективності загалом.

Мета статті. Дослідити мережеві вимірювальні засоби та параметри їх роботи на вітрових електростанціях. Запропонувати концепцію вимірювання робочих характеристик вітрових електрогенераторів з використанням сенсорних мереж. Провести моделювання робочих характеристик електрогенератора вітрової турбіни, як окремо, так і у складі мережі.

Виклад основного матеріалу. Для побудови сенсорної мережі, до складу якої може входити невелика кількість вітрових турбін малої потужності, слід визначити параметри, які мають бути враховані. До таких можна віднести: швидкість вітру; температуру поверхні статора; обертальний момент генератора; швидкість обертання валу; вібрації. В залежності від швидкості вітру, вібрацій, обертального моменту а також температури статора має бути побудована АСУ для управління положенням лопаток вітрової турбіни, з можливістю її аварійної зупинки (рис. 1). Моделювання даної схеми з використанням моделей (1-5) при поступальному збільшенні швидкості вітру та інших заданих вхідних параметрах, було здійснено шляхом написання програмного коду і дозволило отримати наступний результат (рис. 2-4)

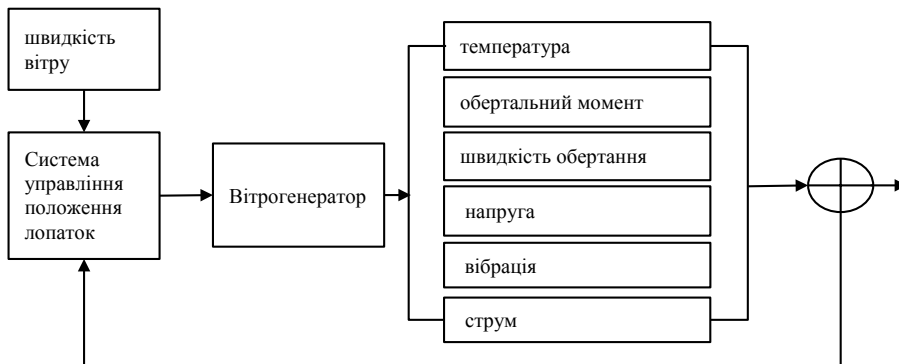


Рис. 1. Структурна схема вимірювальних засобів однієї вітрової турбіни

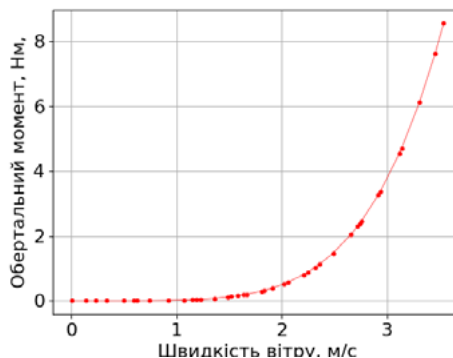


Рис. 2. Залежність обертального моменту від швидкості вітру

Побудовано з використанням Matplotlib

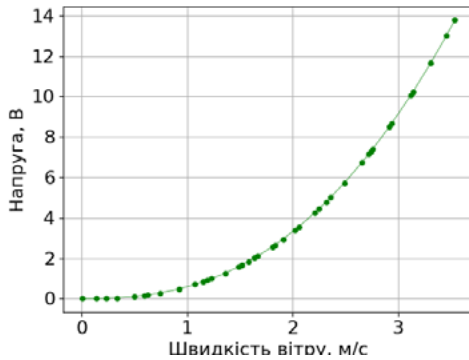


Рис. 3. Залежність напруги електрогенератора та швидкості вітру

Побудовано з використанням Matplotlib

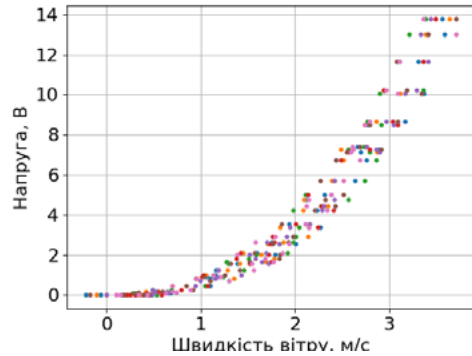


Рис. 4. Вихідні параметри напруги мережі із 10-ти вітрових електрогенераторів

Побудовано з використанням Matplotlib

Динаміка зміни вихідної напруги, отримана за формулою (3), представлена на рис. 3.

Моделювання дозволило встановити номінальну напругу при швидкості вітру 3,5 м/с., яка склала 12 В.

Моделювання отриманих параметрів для мережі вітрогенераторів з урахуванням відхилень швидкості вітру $\pm 0,5$ м/с, дозволило встановити, що при застосуванні 10 вітрових турбін, напруга коливатиметься в межах 12 вольт при наявності вітру на менше 3,5 м/с.

Сенсорну мережу можна побудувати, в залежності від розташування вітрових турбін за топологією зірки, дерева, або mesh мережі (рис. 5), в Управління мережею може здійснюватись в автоматизованому режимі використовуючи серверне програмне забезпечення та стандартні web-протоколи для передачі даних.

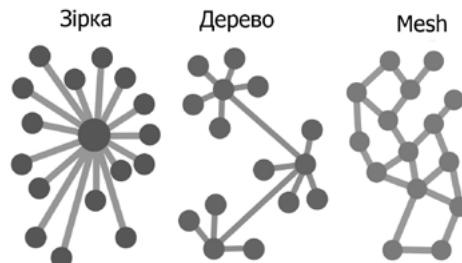


Рис. 5. Топологія побудови сенсорної мережі

Висновок. Сенсорні вимірювальні мережі можуть бути реалізовані для контролю та управління вітровими станціями малої потужності. Моделювання робочих характеристик вітрових турбін, як окремо так і у складі мережі, дозволило встановити відповідну напругу при середньостатистичній швидкості вітру $3,5 \pm 0,5$ м/с. Із відповідними вхідними параметрами, в мережі із 10 вітрових турбін, напруга коливатиметься в межах 12 вольт при наявності вітру на менше 3,5 м/с.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Krishnamurthy V. POMDP multi-armed bandit formulation for energy minimization in sensor networks. *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing (ICASSP)*. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2005. P. 793–796. doi: 10.1109/ICASSP.2005.1416423.
2. Дядюнов Александр Николаевич, Смолев Дмитрий Владимирович Моделирование канала связи беспроводных локальных сетей. *Научный вестник МГТУГА*. 2013. № 3 (189). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-kanala-svyazi-besprovodnyh-lokalnyh-setey> (дата обращения: 26.05.2022).
3. Кирпичникова, И.М. Преобразование энергии в ветроэнергетических установках / И.М. Кирпичникова, А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин. *Альтернативная энергетика и экология*. 2010. № 1. С. 93–97.
4. Пронин, Н. В., & Мартьянов, А. С. (2012). Модель ветрогенератора ВЭУ-3 в пакете Matlab. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*, (37 (296)), 143–145.
5. Татарникова Т.М., Бимбетов Ф., & Горина Е.В. (2022). Алгоритм энергоэффективного взаимодействия узлов беспроводной сенсорной сети. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 22 (2), 294–301.
6. Dressler F. A Study of Self-Organization Mechanisms in Ad Hoc and Sensor Networks. *Computer Communications*. 2008. V. 31, N 13. P. 3018–3029.

REFERENCES:

1. Krishnamurthy V. (2005) POMDP multi-armed bandit formulation for energy minimization in sensor networks, *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing (ICASSP)*. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2005. P. 793–796. doi: 10.1109/ICASSP.2005.1416423.
2. Dyadyunov Aleksandr Nikolayevich, Smolev Dmitriy Vladimirovich (2013) Modelirovaniye kanala svyazi besprovodnykh lokal'nykh setey [Modeling the communication channel of wireless local networks], *Nauchnyy vestnik*, Vol. 3 (189), P. 20–28.
3. Kirpichnikova, I.M. (2010) Preobrazovaniye energii v vetroenergeticheskikh ustanovkakh [Energy transformation in wind energy installations], *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*, Vol. 1., P. 93–97.
4. Pronin, N. V., Mart'yanov, A. S. (2012). Model' vetrogeneratora VEU-3 v pakete Matlab [Model of the VEU-3 wind generator in the Matlab package], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*, Vol. 37 (296), P. 143–145.
5. Tatarnikova T.M., Bimbetov F., Gorina Ye.V. (2022). Algoritm energoeffektivnogo vzaimodeystviya uzlov besprovodnoy sensornoy seti [The algorithm of energy-efficient interaction of the units of the wireless sensory network], *Nauchno-tehnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*, Vol. 22 (2), P. 294–301.
6. Dressler F. A Study of Self-Organization Mechanisms in Ad Hoc and Sensor Networks (2008) *Computer Communications*. 2008, Vol. 31(13), P. 3018–3029.