

УДК 621.548.4.001.24

## АПРОКСИМАЦІЯ АЕРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРОВОЇ ТУРБІНИ ВІТРОВОДОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ В НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ МЕТОДОМ ЗАМІНИ ЗМІННИХ

С.Т.Пазич, аспірант

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,

02094, м. Київ, вул. Гната Хоткевича, 20А, Тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: hydro@ive.org.ua

*Розроблено процедуру апроксимації аеромеханічних характеристик вітрової турбіни в навантажувальних режимах роботи з різними кутами повороту лопатей методом заміни змінних, який дозволяє трансформувати вихідну двопараметричну поверхню характеристик до однопараметричної універсальної характеристики та рівняння зв'язку між змінними. Бібл. 14, табл. 1, рис. 6.*

**Ключові слова:** вітротурбіна, аеромеханічна характеристика, апроксимація, потужність, момент.

## APPROXIMATION OF AEROMECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE WIND TURBINE OF A WIND PUMP INSTALLATION IN THE LOAD OPERATION MODES BY THE METHOD OF CHANGING THE VARIABLES

Pazych S.

Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine,

Hnata Khotkevycha, 20A, 02094, Kyiv-94, Ukraine, Phone/fax: +38-044-206-28-09, e-mail: hydro@ive.org.ua

*The procedure of the approximation of the aeromechanical characteristics of the wind turbine in the loading modes of operation with different angles of rotation of the blades by the method of replacement of variables is developed which allows to transform the output two-parameter surface of the characteristics to a one-parameter universal characteristic and the equation of communication between the variables. References 14, table 1, figures 6.*

**Key words:** wind turbine, aeromechanical characteristic, approximation, power, moment.



Пазич С.Т.  
Pazych S.

**Відомості про автора:** аспірант, інженер відділу гідроенергетики, Інституту відновлюваної енергетики НАНУ.

**Освіта:** вища, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Сікорського". Спеціальність "Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії".

**Публікації:** 8.  
ORCID:0000-0002-6310-9842

**Information about the author:**

postgraduate, engineer of Hydropower Engineering Department, Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine

**Education:** National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute". Specialty: "Non-traditional and renewable energy sources".

**Publications:** 8.  
ORCID:0000-0002-6310-9842

### Перелік умовних позначень

ВЕУ – вітроелектрична установка;

ВТ – вітротурбіна;

Q – кут установки лопаті;

Z – швидкохідність;

C<sub>m</sub> – аеромеханічний момент;C<sub>p</sub> – коефіцієнт потужності вітроустановки;(C<sub>m</sub>)<sub>в</sub> – базовий аеромеханічний момент;Z<sub>в</sub> – базова швидкохідність;Z<sub>max</sub> – максимальна швидкохідність;M<sub>т</sub> – момент вітротурбіни, Нм;

R – радіус ротора, м;

ρ – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;

v – швидкість вітру, м/с;

ω – частота обертання, рад/с;

a, b, C<sub>1</sub>...C<sub>6</sub> – емпіричні коефіцієнти

**Вступ.** Моделювання механічних та енергетичних процесів вітроенергетичної установки (ВЕУ) в навантажувальних режимах роботи потребує використання залежності моменту вітрогенератора (ВТ) від швидкості вітру, частоти обертання та кута повороту лопатей [1], яка являє собою гіперповерхню типу:

$$M_T = f(v, \omega, Q), \quad (1)$$

де  $M_T$  – момент вітрогенератора,  $v$  – швидкість вітру,  $\omega$  – частота обертання ВТ,  $Q$  – кут установки лопатей ВТ.

Згідно з теоретичними основами вітроенергетики [2] момент вітрогенератора (1) представляється через явну функцію швидкості

вітру та поверхню аеромеханічних характеристик  $C_m(Z, Q)$  з допомогою формули:

$$M_T(Z, Q) = 0.5\pi R^3 \rho v^2 C_m(Z, Q), \quad Z = \omega R / v \quad (2)$$

де  $R$  – радіус ротора,  $\rho$  – густина повітря,  $Z$  – швидкісна відношення,  $C_m$  – аеромеханічний момент.

Поверхня аеромеханічних характеристик за різних значень  $Z$  та  $Q$  може бути розрахована за результатами продувки профілю лопаті, або моделі вітрогенератора, в аеродинамічній трубі. Зазвичай, поверхня представляється сукупністю неперервних залежностей для дискретного ряду значень  $Q$ , як показано на рис.1., для лопаті з аеродинамічним профілем [3]:

$$C_{m_i} = (Z, Q_i), \quad Q_i = const, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

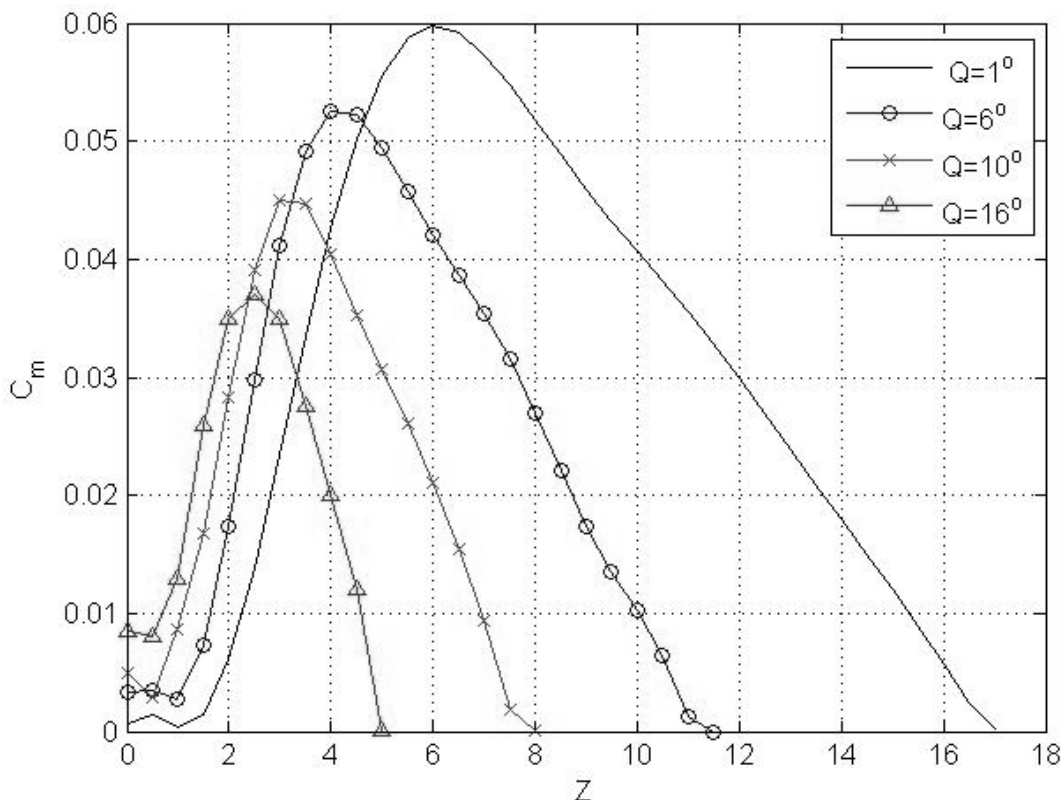


Рис.1. Залежності відносного аеромеханічного моменту від швидкісного відношення.

Fig.1. Dependencies relative aeromechanical moment from tip speed ratio wind turbine.

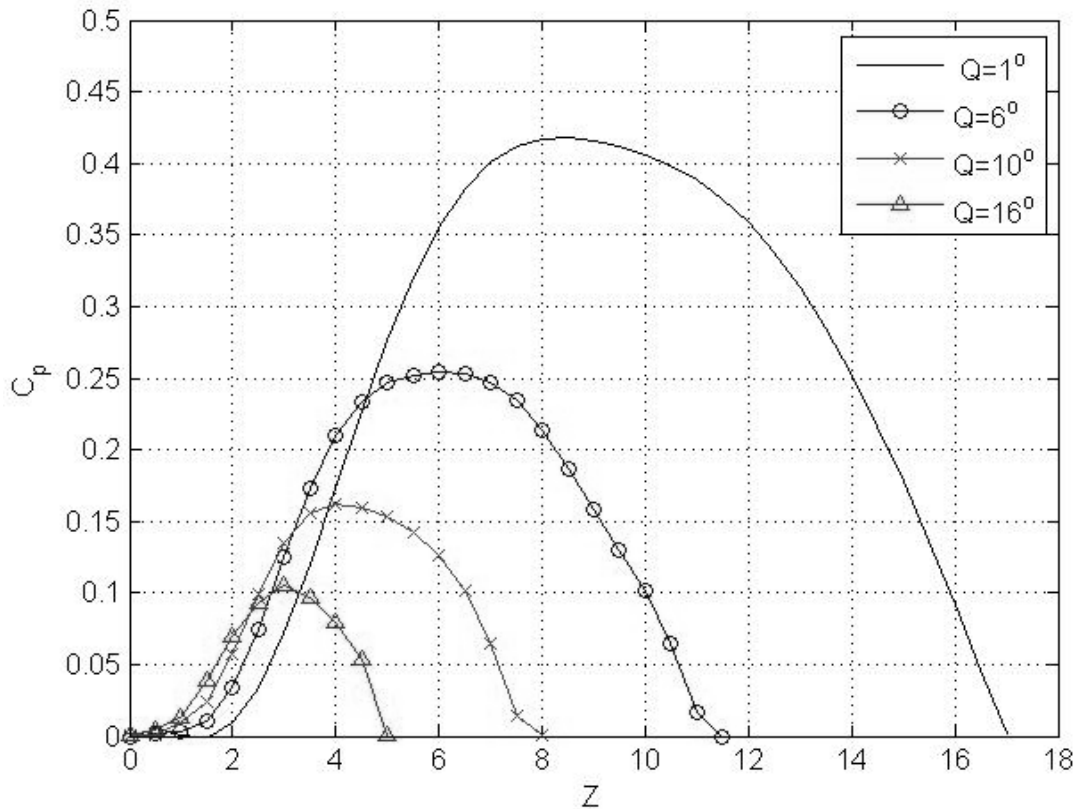


Рис.2. Залежності коефіцієнт потужності вітроустановки від швидкохідності.

Fig.2. Dependencies power factor of the wind turbine from tip speed ratio wind turbine.

Отримання неперервної поверхні  $C_m(Z, Q)$  на основі сукупності  $C_{mi}(Z, Q_i)$  за фіксованих значень кута повороту (3) для моделювання автоматичного керування режимами роботи може бути успішно вирішено шляхом застосування інтерполяційних двопараметричних сплайн-функцій [4]. Інший підхід для отримання неперервної поверхні  $C_m(Z, Q)$  застосовано в прикладному пакеті математичного моделювання MATLAB Simulink [5], де використовуються розроблені емпіричні аналітичні двопараметричні залежності для  $C_p(Z, Q)$  [6-9]:

$$C_m(Z, Q) = C_p(Z, Q) / Z \tag{4}$$

$$C_p(Z, Q) = C_1 \cdot \left( \frac{C_2}{\beta} - C_3 \cdot CQ - C_4 \right) \cdot e^{\frac{-C_5}{\beta}} + C_6 \cdot CZ; \tag{5}$$

$$\text{де } \beta = \frac{1}{\frac{1}{Z + a \cdot CQ} - \frac{b}{Q^3 + 1}}$$

$a, b, C_1, \dots, C_6$  – емпірично визначені коефіцієнти.

Вираз (5) не має можливості однозначно розрахувати емпіричні коефіцієнти в залежності від поставленої задачі [10]. Використання опосеред-

кованого визначення  $C_m(Z, Q)$  по (4) в довільному діапазоні зміни  $Z$  вимагає введення додаткових припущень, так як в околі значення  $Z=0$  аеромеханічна характеристика не може бути отримана однозначно (рис.2).

Проте необхідно зазначити, що обидва методи представлення неперервної поверхні надто обтяжливі для реалізації в системі автоматичного керування режимами роботи ВЕУ на основі мікропроцесорного контролера. Мета даної публікації полягає в розробленні методу отримання неперервної поверхні  $C_m(Z, Q)$  на основі приведення сукупності аеромеханічних характеристик за фіксованого значення кута повороту  $C_{mi}(Z, Q_i)$  до однопараметричної універсальної характеристики шляхом заміни змінних та простого рівняння зв'язку між змінними

**Основні положення методу.** Весь метод можна умовно поділити на три етапи. Перший етап полягає в заміні змінних по обох координатах і представленні апроксимаційної залежності в новій системі координат. На другому етапі проводиться визначення рівняння зв'язку між змінними для двох систем координат. На третьо-

му етапі розраховується ордината неперервної поверхні  $C_m(Z, Q)$  для довільних значень параметрів  $Z, Q$ .

**Перший етап.** В якості вихідної інформації використовується сукупність залежностей коефіцієнта потужності від швидкохідності за фіксованих значень кута повороту лопатей (рис.2) :

$$C_{pi} = (Z, Q_i), \quad Q_i = \text{const}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

Для кожної окремої кривої визначається базове значення швидкохідності  $Z_{Bi}$ , яке відповідає максимальному значенню коефіцієнта потужності  $(C_{pi})_{\text{max}}$ . Після підстановки  $Z_{Bi}$  в (3), отримуємо ряд базових значень  $(C_m)_{Bi}$ . Кількісні значення базових величин, відповідно до приведених залежностей на рис.1 та рис.2, наведені в табл.1.

**Таблиця 1. Значення базових величин для різних кутів повороту лопатей**

**Table 1. The significance of the base values for different angles of blade rotation**

$Q_i$	$Z_{Bi}$	$(C_m)_{Bi}$
1°	8,5	0,049
6°	6	0,043
10°	4	0,04
16°	3	0,035

Застосовуємо наступну заміну змінних

$$C_{mi}^* = \frac{C_{mi}}{(C_m)_{Bi}}, \quad Z_i^* = \frac{Z_i}{Z_{\text{max}i}}, \quad (7)$$

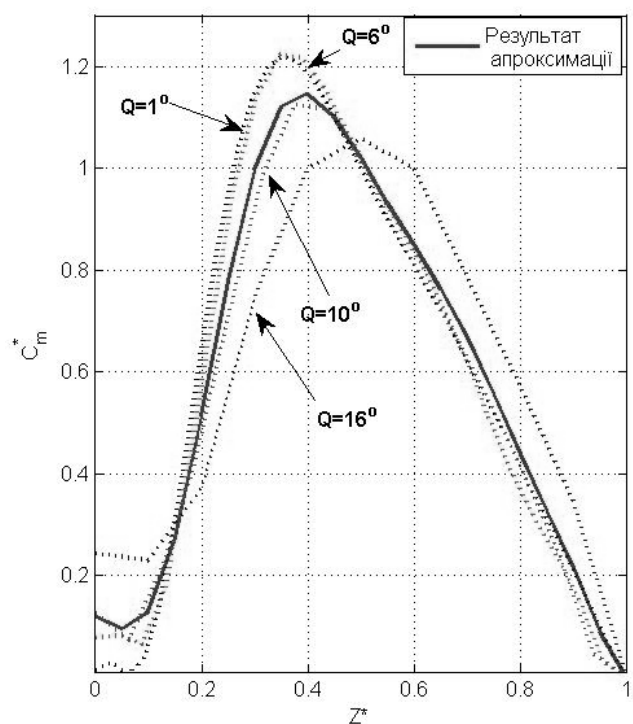
де  $Z_{\text{max}i}$  максимальне значення швидкохідності за  $Q_i$ .

Трансформуємо сукупність аеромеханічних характеристик до нової системи координат

$$C_{mi}^*(Z^*, Q_i), \quad Q_i = \text{const}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (8)$$

Результати в новій системі координат наведені на рис.3. Вони засвідчують, що заміна змінних сприяла суттєвому стисненню сімейства характеристик, особливо в правій області від  $Z_i^*$ , яка відповідає навантажувальним режимам роботи вітрогенератора [2]. В цій області характеристики

практично співпадають в діапазоні зміни кутів повороту (1...10) градусів. Зі збільшенням кута повороту збільшується і розбіжність характеристик. Якщо необхідний діапазон зміни кута більше за 10 градусів, то аеромеханічна характеристика може бути представлена дискретно для цього значення. Вузьке сімейство характеристик може бути апроксимоване однією універсальною характеристикою для вибраного діапазону зміни кута повороту  $C_m^*(Z^*)$ . На рис.3 наведено результат такої апроксимації в діапазоні зміни кутів повороту (1...16) градусів у відповідності до вихідних даних.



**Рис. 3. Аеромеханічна характеристика у в.о.**

**Fig. 3. Aeromechanical characteristics in r.u.**

На **другому етапі** визначаються дві залежності  $(C_m)_B(Q)$  та  $Z_{\text{max}}(Q)$ , що наведені на рис.4 згідно вихідних даних. Для подальшого використання вони можуть бути апроксимовані неперервними функціями, зокрема, квадратичними:

$$(C_m)_B = 1.8 \cdot 10^{-5} Q^2 - 0.0012 Q + 0.05 \quad \text{при } 1^\circ \leq Q \leq 16^\circ \quad (9)$$

$$Z_{\text{max}} = 0.031878 Q^2 - 1.3448 Q + 18.338 \quad \text{при } 1^\circ \leq Q \leq 16^\circ \quad (10)$$

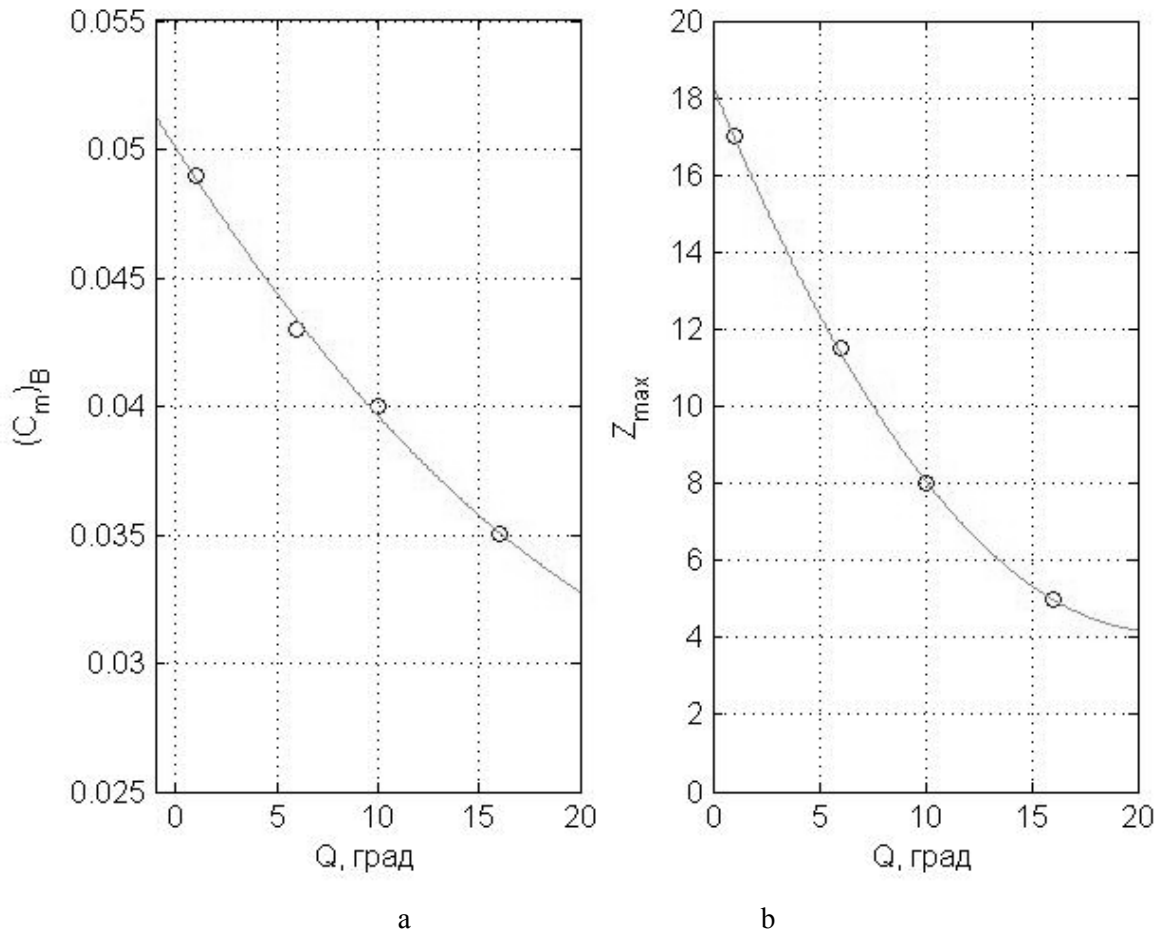


Рис. 4. Залежності  $(C_m)_B(Q)$ -а і  $Z_{max}(Q)$ -б.

Fig. 4. Dependencies  $(C_m)_B(Q)$ -a end  $Z_{max}(Q)$ -b.

**Третій етап** полягає у розрахунку ординати неперервної поверхні  $C_m(Z,Q)$  для довільних значень параметрів  $Z,Q$ . Послідовність проведення обчислень наступна:

- для заданого значення  $Q$  визначаються  $(C_m)_B$  та  $Z_{max}$  по (9), (10);
- по (7) розраховується  $Z^*$ , а потім по універсальній характеристиці  $C_m^*(Z^*)$  визначається  $C_m^*$ ;
- по (7) розраховується потрібне значення  $C_m$ .

За необхідності розрахунку  $C_{mi}(Z,Q_i)$ , за  $Q_i = const$  достатньо повторити кроки третього етапу за різних значень  $Z$ . Так, на рис.5 наведено сімейство характеристик  $C_{mi}(Z,Q_i)$  для різних

кутів повороту лопатей.

За приклад застосування описаного вище методу визначимо (на основі даних рис.5) закон керування кутом повороту лопатей для стабілізації потужності вітрогенератора в навантажувальних режимах роботи за змінної швидкості вітру [11,12]. Розрахункові дослідження виконувались для вітрогенератора номінальною потужністю 10 кВт на номінальну швидкість вітру 8 м/с за сталої частоти обертання. Отримана функціональна залежність наведена на рис.6. Даний закон керування може бути використаний безпосередньо при реалізації автоматичної системи стабілізації потужності та частоти обертання, а також опосередковано – при визначенні енергетичних показників функціонування вітроустановки [13,14].

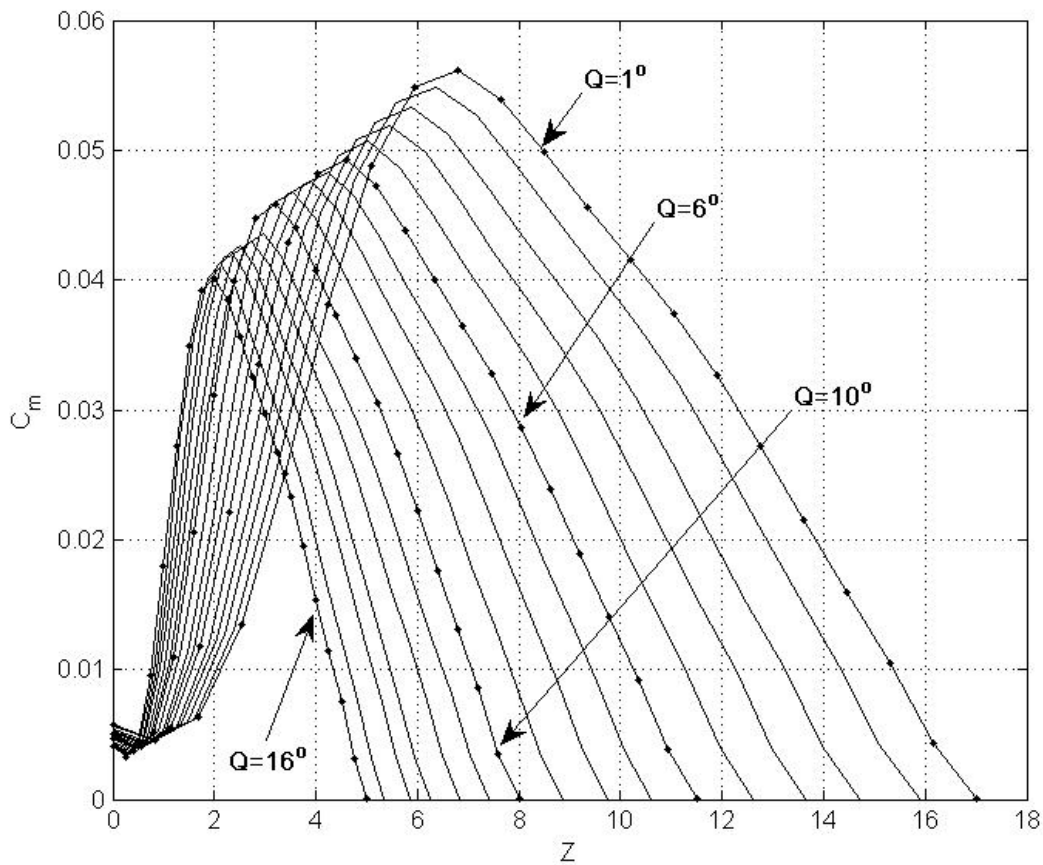


Рис. 5. Результатами апроксимації, при  $Q=1^\circ..16^\circ$ .

Fig. 5. Results of approximation, at  $Q=1^\circ..16^\circ$ .

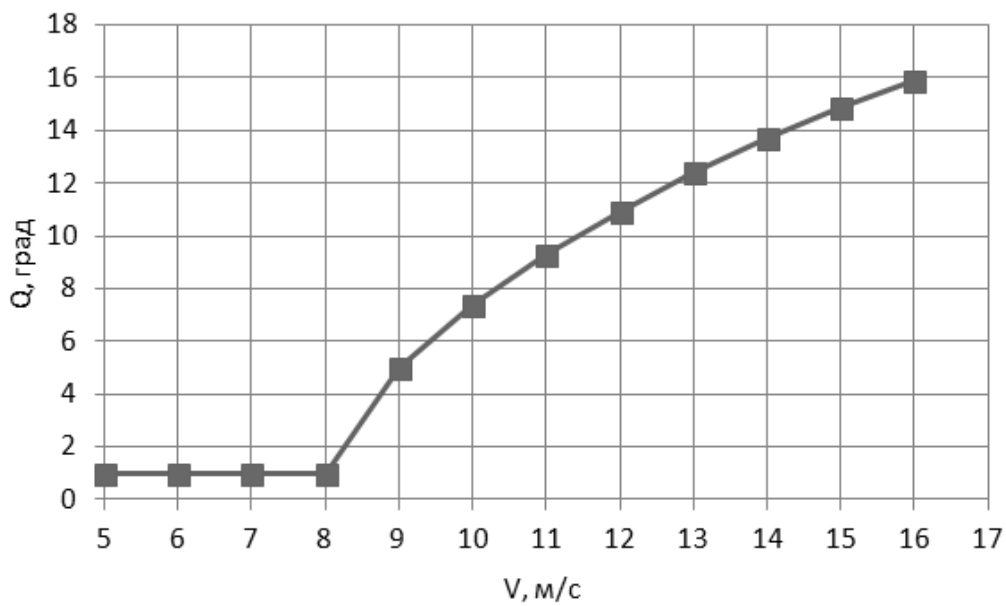


Рис. 6. Закон регулювання кутом повороту лопатей вітрогенератора.

Fig. 6. The law of regulation the angle of rotation the blades of the wind turbine.

**Висновок.** Розроблено метод апроксимації аеромеханічних характеристик вітрової турбіни в навантажувальних режимах роботи з різними кутами повороту лопатей методом заміни змінних, який дозволяє трансформувати вихідну двопараметричну поверхню характеристик до однопараметричної універсальної характеристики та рівняння зв'язку між змінними. Метод призначений для реалізації при програмуванні мікропроцесорних контролерів системи автоматичного керування ВЕУ за змінної швидкості вітру.

1. Васько П.Ф. Математическая модель электромеханической системы ветроэлектрической установки для расчета механических переходных процессов // Техническая электродинамика. – 1997. - №3. - С.44-50.

2. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. М.: Гос.изд.сельхоз. лит., 1957.- 536с

3. Пекур П.П. Імовірнісні характеристики навантажувальних режимів роботи вітроелектричних установок з асинхронними генераторами: автореф. дис., канд.тех. наук: 21.04.09 / Пекур П.П., НАН України – Київ – 2009, ст. 21.

4. Васько В.П. Математична модель ротора вітроустановки як об'єкта керування на основі кубічних сплайнів // Технічна електродинаміка. – 2002. – №6. – С.50-56

5. Черных, И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений [Текст]/И. В.Черных.- М.: ДИАЛОГ - МИФИ, 2004, 496 с.

6. Siegfried Heier. Grid Integration of Wind Energy: On-shore and Offshore Conversion Systems, 3rd Edition Wiley & Sons Ltd, 2014.

7. Anderson P. M. and Bose, A. "Stability simulation of wind turbine systems", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 102, pp. 3791–3795, Dec. 1983.

8. Slootweg J. G., S.W.H. de Haan, Polinder H. and Kling W.L., (Feb. 2003) "General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 1, pp. 144-151.

9. Man, D. T., Sullivan, J. P. and Wasynczuk, O., Dynamic Behavior of a Class of Wind Turbine Generators During Random Wind Fluctuations, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, June 1981, PAS-100(6).

10. Вербовий А.П. Пазич С.Т., Аналіз двопараметричних моделей вітрової турбіни для зарядки гідроакмулювальної електростанції // Гідроенергетика України, 2017. №3-4., с. 75-77. – ISSN 1812–9277.

11. Денисенко Г.И., Васько П.Ф., Пекур П.П. Стохастическое моделирование параметров ветра для задач ветроэнергетики. // Известия АН СССР Энергетика и транспорт. - 1990. - №2. - С. 109-115.

12. Васько П.Ф., Вербовий А.П., Пазич С.Т. Реалізація стохастичної моделі поздовжньої складової швидкості вітру

для задач вітроенергетики // Відновлювана енергетика. – 2017. – №3. – С. 54–61.

13. Брыль А.А., Васько П.Ф., Пекур П.П. Определение технических показателей эффективности использования ветроэлектрических агрегатов в Украине // Энергетика и электрификация. – 1995. -№2. – С. 48-51.

14. Васько П.Ф.. Разраунок показників технічної ефективності застосування вітроелектричних установок за результатами строкових вимірювань швидкості // Технічна електродинаміка. – 2001. - №6. – С.45-49.

#### АПРОКСИМАЦИЯ АЭРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОВОЙ ТУРБИНЫ ВЕТРОВОДОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ В НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ МЕТОДОМ ЗАМЕНЫ ПЕРЕМЕННЫХ

С.Т.Пазыч, аспирант

Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, 02094, м. Киев, ул. Гната Хоткевича, 20А

Тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: hydro@ive.org.ua

*Разработана процедура аппроксимации аэромеханического характеристик ветровой турбины в погрузочных режимах работы с разными углами поворота лопастей методом замены переменных, который позволяет трансформировать исходную двухпараметрическую поверхность характеристик к однопараметрической универсальной характеристики и уравнения связи между переменными. Библ. 14, табл. 1, рис. 6.*

**Ключевые слова:** ветротурбина, аэромеханического характеристика, аппроксимация, мощность, момент.

#### REFERENCES

1. Vasko P.F. Matematicheskaya model elektromehani-cheskoy sistemy+ vetroelektricheskoy ustanovki dlya rascheta mehanicheskikh perehodnykh protsessov [Mathematical model of the electromechanical system of the wind power installation for the calculation of mechanical transients] // Tehnicheskaya elektrodinamika [Technical electrodyamics]. – 1997. –№3. – С.44-50. [in Russ]

2. Fateev E. M. Vetrodvyhately y vetroustanovky [Windmills and wind turbines]. Moscow: GOS.ed.agricultural. lit., 1957.- p. 536 [in Russ]

3. Pekur P.P. Imovirnisni kharakterystyky navantazhuval'nykh rezhymiv roboty vitroelektrychnykh ustanovok z asynkhronnymy heneratoramy [Probabilistic characteristics of loading modes of wind power plants with asynchronous generators]: abstract diss., PhD:21.04.09 / Pekur P.P. NAS of Ukraine – Kyiv – 2009, P.21.[in Ukr]

4. Vasko V.P. Matematychna model' ratora vitroustanovky yak ob'yekta keruvannya na osnovi kubichnykh splayniv [The mathematical model of the wind turbine rotor as a control object based on cubic splines] // Tekhnichna elektrodinamika [Technical electrodyamics]. - 2002. - №6. - P.50-56.[in Ukr]

5. *Chernykh I. V.* SIMULINK sreda sozdaniya inzhernykh prilozheniy [SIMULINK: the environment for creating engineering applications] [Text]/I. V. Chernykh.- Moscow: DIALOG - MIFI, 2004, 496 p.[in Russ]

6. *Siegfried Heier.* Grid Integration of Wind Energy: On-shore and Offshore Conversion Systems, 3rd Edition Wiley & Sons Ltd, 2014.

7. *Anderson P. M. and Bose, A.* "Stability simulation of wind turbine systems," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 102, pp. 3791–3795, Dec. 1983.

8. *Slootweg J. G., S.W.H. de Haan, Polinder H. and Kling W.L.,* (Feb. 2003) "General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 1, pp. 144-151

9. *Man, D. T., Sullivan, J. P. and Wasynczuk, O.,* Dynamic Behavior of a Class of Wind Turbine Generators During Random Wind Fluctuations, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, June 1981, PAS-100(6).

10. *Verbovy A.P., Pazykh S.T.* Analiz dvoparametrychnykh modeley vitrovoyi turbiny dlya zaryadky hidroakumulyval'noyi elektrostantsiyi [Analysis of two-parameter models of a wind turbine for charging a pumped storage station] // Hidroenerhetyka Ukrayiny [Hydropower of Ukraine], 2017. №3-4., P. 75-77. – ISSN 1812–9277.[in Ukr]

11. *Denisenko G.I., Vasko P.F., Pekur P.P.,* Stokhasticheskie modelirovaniye parametrov vetra dlya zadach vetroenergetiki.[Stochastic simulation of wind parameters for wind power projects] // Izvestiya AN SSSR Energetika i transport [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR Energy and Transport] - 1990. - №2. - P. 109-115.[in Russ]

12. *Vasko P.F., Verbovy A.P., Pazykh S.T.* Realizatsiya stokhastychnoyi modeli pozdovzhn'oyi skladovoyi shvydkosti vitru dlya zadach vitroenerhetyky [Realization of stochastic model of longitudinal component of wind speed for wind power

problems] // Vidnovlyuvana enerhetyka [Renewable energy], – 2017. – №3. – P. 54–61.[in Ukr]

13. *Bryl A.A., Vasko P.F. Pekur P.P.,* Opredeleniye tehnikeskikh pokazateley effektivnosti ispolzovaniya vetroelektricheskikh agregatov v Ukraine [Definition of technical indicators of efficiency of use the wind-electric aggregates in Ukraine] // Energetika i elektrifikatsiya [Energy and electrification]. – 1995. -№2. – P. 48-51 [in Russ]

14. *Vasko P.F.* Razrakhunok pokaznykiv tekhnichnoyi efektyvnosti zastosuvannya vitroelektrychnykh ustanovok za rezul'tatamy strokovykh vymiryuvan' shvydkosti [Calculation of the technical efficiency of the application of wind power installations based on the results of term velocity measurements] // Tehnicheskaya elektrodinamika [Technical electrodynamics]. – 2001. - №6. – P.45-49. [in Ukr]

#### SYNOPSIS

The purpose of the work was to develop a method for approximating the aggregate aeromechanical characteristics of the wind turbine at discrete values of the angle of rotation to a continuous surface at tip speed ratio wind turbine.

The approximation method consists of three stages. The first stage is to replace the variables on both coordinates and represent the aeromechanical characteristics of the new coordinate system. At the second stage, the determination of the equation of communication between the variables for two coordinate systems is carried out. In the third stage, the ordinates of the continuous surface of the aeromechanical characteristics for arbitrary values of the angle of rotation and tip speed ratio wind turbine are calculated.

The developed method is used to determine the law of regulation the angle of rotation the blades of the wind turbine in the operating range of wind speed change.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2018

Остаточна версія 21.03.2018