

**РОЗПОДІЛ НАВАНТАЖЕННЯ НА КАНАЛИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЕРТАННЯ  
РОТОРА ВІТРОВОЇ ТУРБІНИ, КЕРОВАНОГО ЗМІНАМИ ЇЇ КОНФІГУРАЦІЇ І  
ГАЛЬМІВНОГО МОМЕНТУ ГЕНЕРАТОРА**

С.В. Тарасов<sup>1</sup> [ORCID], О.Н. Молотков<sup>2</sup> [ORCID]

<sup>1</sup>*Інститут транспортних систем та технологій НАН України,  
к.т.н., ст.наук.спів., Україна*

<sup>2</sup>*Інститут транспортних систем та технологій НАН України,  
к.т.н., доц., Україна*

**Анотація.** В роботі розглядається функціонування системи стабілізації обертання ротора Дар'є вертикально-осьової вітроенергетичної установки (ВЕУ), керованого сумісними змінами довжини лопатей, траверс і гальмівного моменту синхронного генератора на постійних магнітах. В такій системі стабілізації значні зміни довжини траверс призводять до змін моменту інерції ротора, що перетворює її на нестационарну і суттєво ускладнює синтез працездатних стійких алгоритмів формування зворотних зв'язків. Для зменшення цього пропонується використання алгоритмів розподілу навантаження на канали змін довжини лопатей і траверс. Доведено, що застосування запропонованих алгоритмів суттєво покращує динаміку системи стабілізації – дозволяє значно зменшити відхилення довжини траверс ротору від їх номінальних значень. Методами вирішення задачі є методи математичного моделювання. Новизна отриманих результатів полягає в поширенні методики розподілу навантаження каналів стабілізації на систему з додатковим керуючим каналом змін гальмівного моменту генератора.

**Ключові слова:** вертикально-осьові турбіни, стабілізація обертання, моделювання, перехідні функції, алгоритми розподілу навантаження, гальмівний момент генератора

### **Вступ**

Можливості вітроенергетики як альтернативного джерела електроенергії все ще залишаються не повністю реалізованими у зв'язку з сукупністю проблем, розв'язання яких вимагає подальших поглиблених теоретичних досліджень [1]. Для ефективної роботи ВЕУ висувають ряд вимог, серед яких: максимальне використання енергії вітру, висока надійність та безпека експлуатації,

можливість функціонування в автоматичному режимі, легкість пристосування до змін напряму та величини швидкості вітрового потоку тощо. Забезпечення частини із перелічених вимог може бути досягнуте шляхом використання адаптаційних можливостей системи стабілізації обертання ротора Дар'є, керованого сумісними змінами його конфігурації і гальмівного моменту синхронного генератора на постійних магнітах. Проблема яка виникає при цьому – забезпечення працездатності каналів стабілізації в умовах залежності тензора інерції ротора від змін довжини траверс. В роботі [2] обґрунтовано алгоритми розподілу навантаження на канали стабілізації швидкості обертання ротора  $\omega$  вертикально-осьових ВЕУ із  $H$ -ротором Дар'є, керованого шляхом сумісних змін довжини лопатей і траверс згідно співвідношень

$$\begin{aligned}\frac{d\Delta\omega}{dt} &= (k_1\Delta V + k_{2h}\Delta H + k_{2r}\Delta R + k_3\Delta N_2 - \Delta\omega) / T, \\ \frac{d\Delta H}{dt} &= (k_{2h}K_2\Delta H + ((K_1T - K_2)\Delta\omega + k_1K_2\Delta V)\gamma_1) / T, \\ \frac{d\Delta R}{dt} &= (k_{2r}K_2\Delta R + ((K_1T - K_2)\Delta\omega + k_1K_2\Delta V)\gamma_2) / T,\end{aligned}\tag{1}$$

де  $\Delta\omega$  – відхилення швидкості обертів ротора змінної конфігурації, від сталого значення  $\omega_0$ ;  $\Delta H$ ,  $\Delta R$ ,  $\Delta N_2$  – зміни довжини лопатей, траверс та потужності генератора відповідно;  $T$ ,  $k_1$ ,  $k_{2h}$ ,  $k_{2r}$ ,  $k_3$  – коефіцієнти лінеаризації, обчислені за конструктивними параметрами ротора ВЕУ та умовам його роботи;  $K_1$ ,  $K_2$  – коефіцієнти зворотних зв'язків в каналах стабілізації змінами довжини лопатей і траверс;  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  – вагові коефіцієнти розподілу навантаження на канали змін довжини лопатей і траверс;  $\Delta V$  зміна швидкості вітру. Чисельні значення  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  обираються за умов

$$\gamma_1 + \gamma_2 = 1, \quad \gamma_1, \gamma_2 \in [0,1]$$

таким чином, щоб забезпечити менше навантаження на канал змін довжини траверс і, як слідство, зробити практично незмінним момент інерції ротора. В роботі що пропонується досліджуються можливості роботи алгоритму розподілу навантаження в каналах змін довжини лопатей і траверс, які працюють сумісно з додатковим каналом стабілізації обертання ротора змінами гальмівного моменту синхронного генератора на постійних магнітах.

Викладення основного матеріалу

Зміни потужності генератора на постійних магнітах  $\Delta N_z$ , керованого змінами резистивного супротиву навантаження, обчислюються із співвідношень [3]

$$\Delta N_z = e\omega_o\Delta i_q, \quad \frac{d\Delta i_q}{dt} = d\Delta\omega + c\Delta i_q, (2)$$

де  $\Delta i_q$  – зміна керуючого струму генератора;  $c$ ,  $d$  і  $e$  – коефіцієнти лінеаризації контуру керування генератора на постійних магнітах [3]

$$c = \left. \frac{\partial i_q}{\partial R_c} \right|_{\lambda=\lambda_o}, \quad d = \left. \frac{\partial i_q}{\partial \omega} \right|_{\lambda=\lambda_o}, \quad e = \left. \frac{\partial M_z}{\partial i_q} \right|_{\lambda=\lambda_o} = \frac{3}{2}n_p\lambda_o,$$

$n_p$  – кількість полюсів,  $\lambda_o$  – коефіцієнт швидкохідності ВЕУ, який відповідає максимуму потужності для швидкості вітру  $V_o$ .

З метою оцінки працездатності і ефективності запропонованих алгоритмів проведено моделювання роботи системи стабілізації обертання ротора ВЕУ із конструктивними параметрами близькими до параметрів ВЕУ-0420, наведеними в таблиці 2 роботи [2].

Обчислені значення перехідних функцій  $\Delta H$ ,  $\Delta R$  системи стабілізації обертання ротора Дар'є для значень параметрів  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  з таблиці 1 роботи [2] наведені на рис. 1 і 2. Номера залежностей відповідають номерам строк таблиці 1.

Наведені перехідні функції демонструють: 1) узгоджені зміни  $\Delta H$  і  $\Delta R$  в залежності від змін параметрів розподілу навантаження  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$ ; 2) при зменшенні  $\gamma_2$  (збільшенні  $\gamma_1$ ) пікові та кінцеві значення перехідних функцій змінної  $\Delta R$  зменшуються, а перехідних функцій змінної  $\Delta H$  узгоджено зростають; 3) пікові та кінцеві значення  $\Delta R$  змінами параметрів  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  з 1/2 до 1/5 вдається зменшити більше ніж у два рази, що суттєво покращує динамічні властивості системи стабілізації – зменшує зміни моменту інерції ротора ВЕУ.

Додатково обраховані перехідні функції за змінними  $\Delta\omega$  і  $\Delta i_q$  прямують до нуля із зростанням часу  $t$ , тобто замкнута система з трьома каналами стабілізації не має статичної помилки. Це дозволяє зробити висновок, що збурюючі впливи змін швидкості вітру цілком і повністю компенсуються змінами конфігурації ротора ВЕУ, а не зростанням гальмівного моменту

генератора, тобто адаптивні можливості ротора змінної конфігурації можуть забезпечити суттєву економію витрат енергії на керування при довготривалих змінах швидкості вітру.

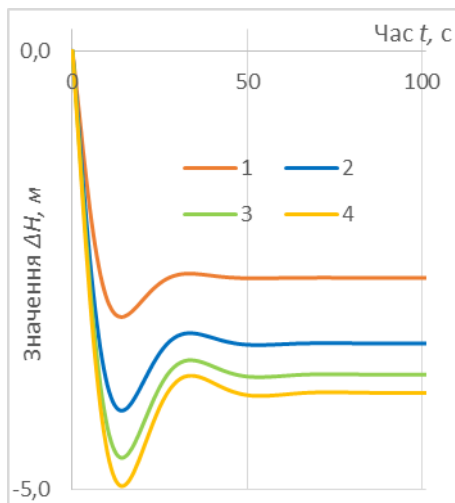


Рисунок 1 – Залежності  $\Delta H$  від часу  $t$  і  $\gamma_2$

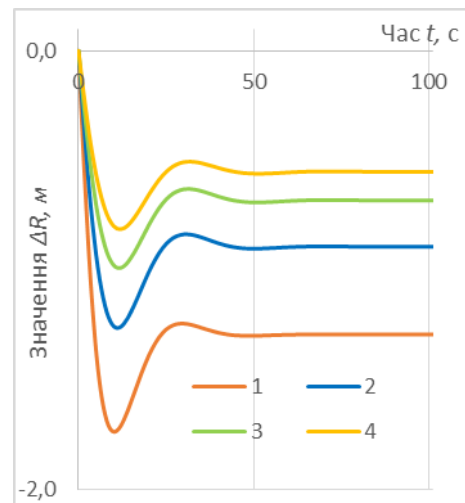


Рисунок 2 – Залежності  $\Delta R$  від часу  $t$  і  $\gamma_2$

Розраховані перехідні функції для  $\Delta H$  і  $\Delta R$  стаціонарної і нестаціонарної систем стабілізації наведені на рис. 3 і 4 відповідно. Цифрами 1 і 2 позначені перехідні функції для значення параметру  $\gamma_2=1/2$ , цифрами 3 і 4 – для значення параметру  $\gamma_2=1/5$ . Непарні позначки відповідають нестаціонарній системі стабілізації, парні – стаціонарній.

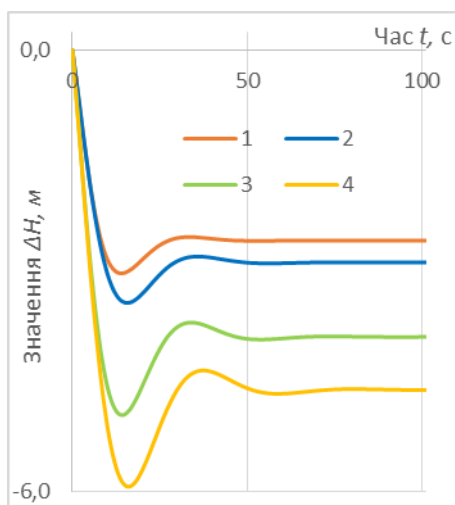


Рисунок 3 – Залежності  $\Delta H$  від часу  $t$  і  $\gamma_2$  для стаціонарної і нестаціонарної систем

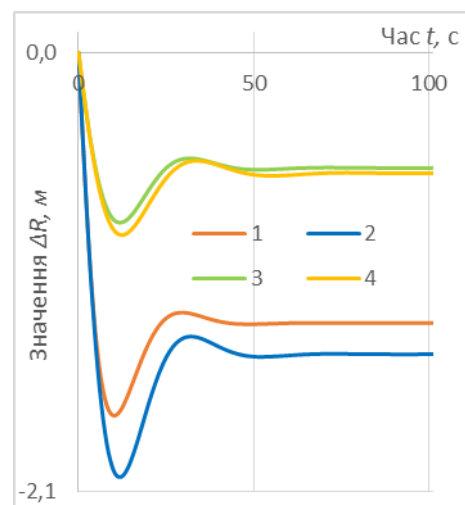


Рисунок 4 – Залежності  $\Delta R$  від часу  $t$  і  $\gamma_2$  для стаціонарної і нестаціонарної систем

Аналіз наведених перехідних функцій дозволяє зробити наступні висновки:

- як стаціонарна так і нестаціонарна системи достатньо точно описують динаміку системи; перехід до розгляду нестаціонарної системи стабілізації дещо уточнює опис динаміки системи;

- нестаціонарна система в цілому уявляє собою систему з практично незмінною динамічною матрицею, тобто аналіз її стійкості можна вести по стаціонарній системі.

### **Висновки**

Проведене моделювання роботи ВЕУ із ротором Дар'є, керованим сумісними змінами довжини лопатей, траверс і гальмівного моменту синхронного генератора на постійних магнітах підтвердило працездатність та ефективність методики розподілу навантаження на канали стабілізації в умовах сумісної роботи всіх трьох каналів стабілізації.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков: М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
2. Тарасов С. В., Молотков О. Н. Стабілізація обертання ротора Дар'є сумісними змінами довжини лопатей і траверс. Технічна механіка, 2024, № 2, с. 92–105. <https://doi.org/10.15407/itm2024.02.092>
3. Melício R., Mendes V.M.F., Catalão J.P.S. Fractional order control and simulation of wind energy systems with PMSG/full-power converter topology. [Інтернет ресурс] Energy Conversion and Management - June 2010. - DOI: 10.1016/j.enconman.2009.12.036

### **LOAD DISTRIBUTION ON THE WIND TURBINE ROTOR'S ROTATION STABILIZATION CHANNELS, CONTROLLED BY CHANGES IN ITS CONFIGURATION AND GENERATOR BRAKING TORQUE**

Tarasov Serhii, Molotkov Oleh

**Abstract.** *The paper considers the functioning of the Darrieus rotor rotation stabilization system of a vertical-axis wind turbine, controlled by simultaneous changes in the length of the blades, traverses, and the braking torque of a permanent magnet synchronous generator. In such a stabilization system, significant changes in the traverse length lead to changes in the rotor moment of inertia, which turns it into a non-stationary one and significantly complicates the synthesis of workable stable algorithms for forming feedback loops. To reduce this, it is proposed to use load distribution algorithms for the*

*channels of changes in the length of the blades and traverses. It is proven that the use of the proposed algorithms significantly improves the dynamics of the stabilization system - it allows to significantly reduce the deviation of the length of the rotor traverses from their nominal values. The methods of solving the problem are mathematical modeling methods. The novelty of the results obtained lies in the extension of the method of load distribution of stabilization channels to a system with an additional control channel for changes in the generator braking torque.*

**Keywords:** *vertical-axis turbines, rotation stabilization, modeling, transient functions, load distribution algorithms, generator braking torque*

#### **REFERENCE**

1. Osnovy vitroenerhetyky: pidruchnyk / H. Pivniak, F. Shkrabets, N. Noiberher, D. Tsyplenkov: M-vo osvity i nauky Ukrainy, Nats. hirn. un-t. – D.: NHU, 2015. – 335 s.
2. Tarasov S.V., Molotkov O.N. Stabilizatsiia obertannia rotora Darie sumisnymy zminamy dovezhyny lopatei i travers. Tekhnichna mekhanika, 2024, № 2, s. 92–105. <https://doi.org/10.15407/itm2024.02.092>.
3. Melício R., Mendes V.M.F., Catalão J.P.S. Fractional order control and simulation of wind energy systems with PMSG/full-power converter topology. [Інтернет ресурс] Energy Conversion and Management - June 2010. - DOI: 10.1016/j.enconman.2009.12.036