

КОРИГУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ РЕГУЛЮВАННЯ РОТОРА ВІТРОУСТАНОВКИ З ВІДЦЕНТРОВИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Отримано 31 жовт. 2022; рекомендовано до публікації 27 груд. 2022
Доступно онлайн 30 груд. 2022

В. М. Головко¹, В. П. Коханевич², М. О. Шихайлов³

¹ проф., д-р техн. наук.
<http://orcid.org/0000-0003-0195-9654>

Автор для кореспонденції: Володимир Коханевич,
e-mail: renewable@ukr.net

² канд. техн. наук.
<http://orcid.org/0000-0003-0033-1355>

³ наук. співр.
<http://orcid.org/0000-0003-1845-9904>

^{1,2,3} Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна.

Точність та надійність систем регулювання обертів та потужності роторів вітроустановок малої потужності з відцентровими регуляторами залежить від динамічних процесів, що виникають під час роботи цих систем. Запропоновані в ряді робіт математичні моделі такого типу регуляторів дали змогу отримати критерії стійкості системи регулювання. При цьому необхідно зазначити, що основним стабілізуючим фактором є сили аеродинамічного демпфування, які залежать від геометричних і аеродинамічних параметрів лопаті та кута її розвороту в процесі регулювання. Вказані параметри не завжди дозволяють отримати бажаний вид перехідного процесу. В цій роботі отримані вирази для коефіцієнтів діаграми Вишнеградського для флюгерного та антифлюгерного видів регулювання з урахуванням параметрів ротора та відцентрового регулятора, що дають змогу визначити вид перехідного процесу. Встановлена лінійна залежність між коефіцієнтами діаграми Вишнеградського, що дозволяє визначити необхідну величину коефіцієнта демпфування в тому разі, якщо параметри системи не забезпечують необхідний перехідний процес. Також розглянута конструкція гідравлічного пристрою демпфування, що розроблений для регулювання повороту лопаті, й отримано вирази для розрахунку параметрів цього пристрою демпфування. Бібл. 11.

Ключові слова: вітроенергетика, вітроустановка, відцентровий регулятор ротора вітроустановки.

STABILITY OF THE WIND TURBINE ROTOR REGULATION SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT IMPROVED MATHEMATICAL MODELS OF THE CENTRAL REGULATOR

Received 31 Oct. 2022; accepted 27 Dec. 2022.
Available online 30 Dec. 2022

V. Golovko¹, V. Kokhanevich², M. Shykhailov³

¹ prof., Dr. tech. Sciences.
<http://orcid.org/0000-0003-0195-9654>

Author for correspondence: Volodymyr Kokhanevich,
e-mail: renewable@ukr.net

² Cand. of tech. Sciences.
<http://orcid.org/0000-0003-0033-1355>

³ Researcher.
<http://orcid.org/0000-0003-1845-9904>

^{1,2,3} Institute of renewable energy, NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine.

The accuracy and reliability of the systems for regulating the speed and power of the rotors of low-power wind turbines with centrifugal regulators depends on the dynamic processes that occur during the operation of these systems. Mathematical models of this type of regulators proposed in a number of works made it possible to obtain criteria for the stability of the regulation system.

At the same time, it should be noted that the main stabilizing factor is the aerodynamic damping force, which depends on the geometric and aerodynamic parameters of the blade and its turning angle during adjustment. These parameters do not always allow you to get the desired type of transition process. In this work, expressions

for the coefficients of the Vyshnegradsky diagram for vane and anti-vane types of regulation are obtained, taking into account the parameters of the rotor and centrifugal regulator, which allow to determine the type of transition process. A linear relationship between the coefficients of the Vyshnegradsky diagram is established, which allows determining the required value of the damping coefficient, in case the system parameters do not provide the necessary transition process. The design of the hydraulic damping device, which is designed to be adjusted by rotating the blade, is also considered, and an expressions for calculating the parameters of this damping device is obtained. Bibl. 11.

Key words: wind power, wind turbine, centrifugal regulator of the rotor of the wind turbine.

Перелік використаних позначень та скорочень

M_P	– рушійний момент ротора	Ω	– кут між хордою лопаті й державками відцентрових тягарців
$\bar{M}_P$	– відносний рушійний момент ротора	$\Delta\varphi$	– кут між хордою лопаті й вектором моменту інерції лопаті
M_H	– момент навантаження	J_T	– момент інерції відцентрових тягарців
ω	– кутова швидкість обертання ротора	J_L	– момент інерції лопаті
V	– швидкість повітряного потоку, що набігає на ротор	$F_{\Pi p_0}$	– величина початкового натягу пружини регулювання
Z	– швидкохідність ротора	$\bar{A}$	– величина початкового натягу пружини регулювання, приведена до довжини кривошипа та жорсткості пружини
K	– коефіцієнт аеродинамічного моменту демпфування	k	– жорсткість пружини регулювання
φ	– кут установлення лопаті, профілю елемента лопаті	l	– довжина кривошипа механізму регулятора
φ_0	– початковий кут установлення лопаті		
i	– кількість лопатей		
θ	– кут між кривошипом і хордою лопаті		

Вступ. Вітроустановки (ВУ) в процесі їх експлуатації мають функціонувати, як в широкому діапазоні швидкостей вітру, так і в певному діапазоні зміни навантажень. Стабілізація обертів і потужності в таких умовах забезпечується системами регулювання, серед яких можна виокремити системи регулювання повороту лопаті, що використовують як регульовальний засіб відцентровий регулятор [1–3]. Необхідно зазначити, що серед численних конструкцій регуляторів, ці регулятори вирізняються простотою конструкції та надійністю. Теоретичні основи статичного процесу регулювання та перехідних процесів розглянуто в роботах [4–8]. Запропоновані в цих роботах математичні моделі відцентрових регуляторів роторів вітроустановок дали змогу отримати як рівняння руху системи регулювання, так і визначені критерії її стійкості для флюгерного та антифлюгерного видів регулювання.

Постановка завдання. Рівняння руху системи регулювання і визначені критерії її стійкості не завжди є достатніми для проектування систем регулювання роторів вітроустановок з відцентровими регуляторами роторів. У процесі регулювання бажано, щоб перехідний процес з одного статичного стану в інший відбувався за одне коливання, тобто щоб цей процес був аперіодичним. Суттєвою відмінністю відцентрових регуляторів роторів вітроустановок від традиційних є те, що сили тертя в них практично відсутні, а основну роль виконують сили аеродинамічного демпфування, що залежать від геометричних і аеродинамічних параметрів лопаті та величини кута розвороту лопаті в процесі регулювання. Вказані

параметри не завжди дозволяють отримати бажаний вид перехідного процесу, особливо це стосується антифлюгерного регулювання, де величина кута розвороту лопаті незначна. Для вирішення цієї задачі була запропонована система регулювання з пристроєм демпфування (рис. 1), так і сама конструкція гідравлічного пристрою демпфування (рис. 2) [9].

Запропонована система регулювання містить відцентрові тягарці (1), що закріплені на махах лопатей (2), які розміщені в підшипникових вузлах маточини (3). У нижній частині махів лопаті закріплений кривошипно-важільний механізм (4), який в свою чергу з'єднаний з пусковою втулкою (5), що має можливість здійснювати зворотно-поступальний рух вздовж валу (6) маточини (3). На валу (6) розміщена робоча втулка (7), що також має можливість здійснювати зворотно-поступальний рух вздовж цього валу. Між пусковою (5) і робочою (7) втулками встановлена пускова пружина (8), при цьому з другого боку між робочою втулкою (7) та упорною втулкою (9), що жорстко закріплена на валу (6), розташована пружина регулювання (10). Пускова втулка за допомогою пальця (11) з'єднується з тягою (12) пристрою демпфування. Описана система регулювання з пусковою пружиною використовується для антифлюгерного регулювання, в разі флюгерного регулювання пускова пружина відсутня.

Пристрій демпфування складається з тяги (12), що одним кінцем з'єднана з втулкою (5), а іншим – з однією з гнучких мембран (13). У свою чергу ця гнучка мембрана закріплена на одному з боків диску (14), до якого з

іншого боку також приєднана ще одна гнучка мембранна (13). У тілі диску (14) встановлюються пакети дросельних шайб (15) та зворотний клапан (16), наприклад, у вигляді підпружиненої кульки.

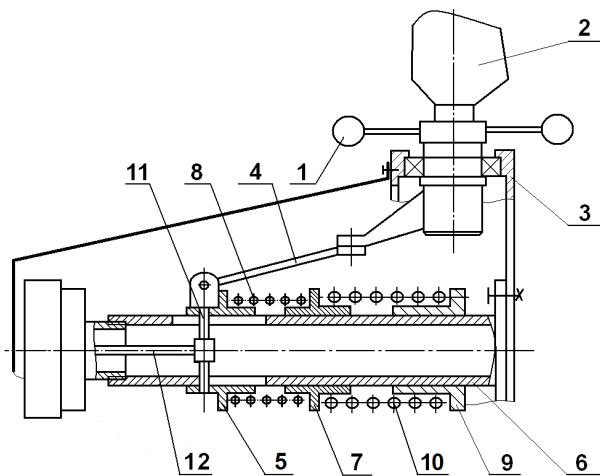


Рис. 1. Загальний вигляд системи регулювання
Fig. 1. General view of the regulation system

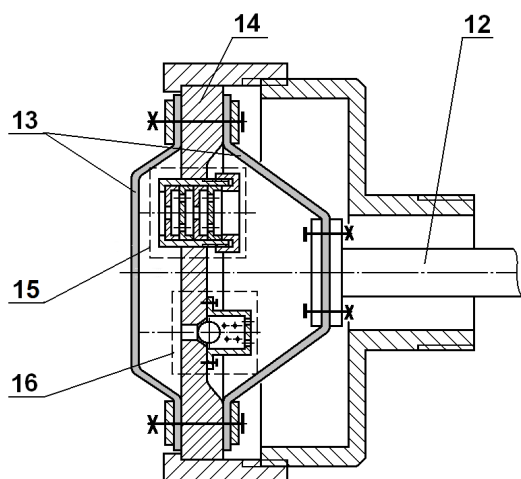


Рис. 2. Загальний вигляд пристрою демпфування
Fig. 2. General view of the damping device

Працює запропонована конструкція наступним чином. При наявності робочої швидкості вітру ротор починає обертатись і виникає складова відцентрової сили, що діє на тягарці (6), яка виводить тягарці в площину обертання ротора і тим самим розвертає лопаті в бік зменшення кута встановлення лопаті (при антифлюгерному регулюванні), або збільшення кута встановлення (при флюгерному регулюванні). При цьому завдяки важільно-шарнірному механізму (4), рух передається на втулку (5), яка починає переміщуватися та стискувати пускову пружину (8). При досягненні робочих кутів установки лопаті втулка (5) вступає в контакт робочою втулкою (7), і таким чином, за умови подальшого збільшення кутів швидкості ротора, почне стискуватись уже робоча пружина (10). При флюгерному регулюванні пускова пружина відсутня і важільно-шарнірний механізм відразу передає рух на робочу втулку. Оскільки втулка (1)

з'єднана з тягою (12), то переміщення втулки (5) передається на цю тягу і далі, відповідно, на правий гнучкий елемент (13). При цьому робоча рідина йде через пакет дросельних шайб (15). Цей пакет має досить суттєвий гідравлічний опір, що створює ефект демпфування, а тому швидкий вихід лопатей на пускові кути унеможливується. Зворотний клапан (16) дає змогу в разі потреби змінювати величину демпфування залежно від напрямку руху тяги (12) та втулки (5) за рахунок того, що частина робочої рідини проходить без опору через зворотний клапан (16).

Результати досліджень. Якщо система регулювання відповідає критеріям стійкості, то, враховуючи що наша система руху при регулюванні відцентровим регулятором описується рівняннями третього порядку, надалі для визначення виду перехідного процесу можна скористатись розширеною діаграмою Вишнеградського (рис. 1) та коефіцієнтами характеристичного рівняння [10]. При цьому характеристичне рівняння $\lambda^3 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3 = 0$ приводиться до вигляду

$$y^3 + Ay^2 + By + 1 = 0, \text{ де } A = a_1\sqrt[3]{\frac{1}{a_3}}; B = a_2\sqrt[3]{\frac{1}{a_3}}.$$

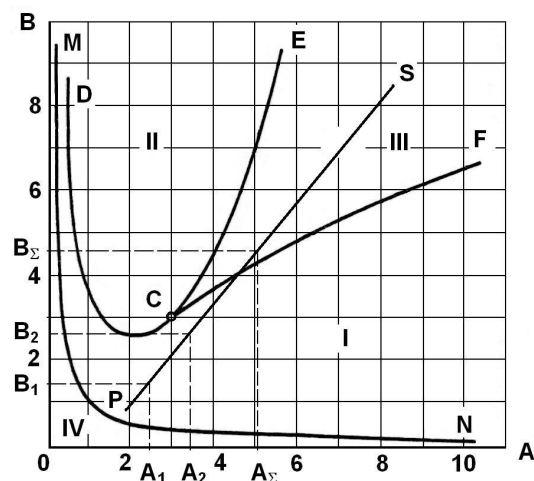


Рис. 3. Розширена діаграма Вишнеградського
Fig. 3. Extended Vyshnegradsky diagram

Розглянемо діаграму Вишнеградського з урахуванням вимог регулювання системи з відцентровим регулятором. Область IV – нестійкий процес. Регулятор не може працювати в цій області. Область I – періодичний затухаючий процес (процес «перерегулювання»). Робота регулятора в цій області можлива, але небажана, оскільки в ній можливі значні відхилення амплітуди коливань перехідного процесу і, відповідно, значні динамічні навантаження на систему регулювання, що може призвести до виходу з ладу системи регулювання і всієї вітроустановки. Область II – монотонно затухаючий процес коливального характеру (процес «недорегулювання»). Робота відцентрового регулятора в цій області можлива. Вона безпечна для регулятора, але регулятор не встигає відпрацьовувати зовнішні збурення. Область III відповідає аперіодичному затухаючому процесу. Параметри відцентрового регулятора повинні забезпечувати сталу

роботу в цій області. Це дозволяє відцентровому регулятору зайняти одним коливанням нове положення рівноваги при виникненні зовнішнього збурення, чи то зміна навантаження на роторі вітроподвигуна, чи зміна швидкості вітру. В цій області можливе незначне «недо-регулювання», тобто відцентрові тягарці не виведуть лопаті до кінця на потрібні кути встановлення, але оскільки в процесі роботи будь-якої вітроустановки наявні вібрації, то через деякий час вони дозволять відцентровим тягарцям довести систему регулювання до потрібного зрівноваженого положення.

Розкриємо коефіцієнти A та B , використовуючи вирази для a_1, a_2, a_3 з [8]:

$$A = (J_P \cdot J_Z)^{-\frac{2}{3}} \cdot (J_P \cdot K + J_Z \cdot m_1) \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{m_1 \cdot n_2 - m_2 \cdot n_1}}; \quad (1)$$

$$B = (J_P J_Z)^{-\frac{1}{3}} \cdot (J_P n_2 + K m_1) \sqrt[3]{\frac{1}{(m_1 n_2 - m_2 n_1)^2}}, \quad (2)$$

Використаємо для коефіцієнтів n_1, n_2, m_1, m_2 вирази з [8] та запишемо коефіцієнти A та B у відповідних параметрах відцентрового регулятора. Тоді вираз для параметра A для флюгерного регулювання набуде вигляду:

$$A = (J_P \cdot J_Z)^{-\frac{2}{3}} \times \left(J_P \cdot K - J_Z \frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^4 \cdot V \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial Z} \right) \times \left[\frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^3 \cdot V^2 \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial \varphi} \right. \\ \left. [J_L \cdot \omega \cdot \sin 2(\varphi + \Delta\varphi) - J_T \cdot \omega \cdot \sin 2(\Omega + \varphi)] - \frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^4 \cdot V \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial Z} \left\{ \frac{k \cdot l^2}{i} \right. \right. \\ \left. \left. [\cos 2(\Theta - \varphi) + \sin(\Theta - \varphi) \cdot (\bar{A} + \sin(\Theta - \varphi_0))] + \omega^2 [J_L \cdot \cos 2(\varphi + \Delta\varphi) + J_T \cdot \cos 2(\Omega - \varphi)] \right] \right]^{-\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

де $J_P = \sum J_{P_i}$ – сума приведених до осі ротора моментів інерції всіх тіл, які кінематично пов'язані з обертанням ротора; $\bar{M}_P$ – рушійний момент ротора; $\bar{M}_H$ – відносний рушійний момент ротора; M_H – момент навантаження; M_A – момент від аеродинамічних сил; M_B – момент відцентрових сил; V – швидкість повітряного потоку, що набігає на ротор; K – коефіцієнт аеродинамічного моменту демпфування; ω – кутова швидкість ротора; $Z = \omega R / V$ – швидкохідність ротора; R – радіус ротора; $\bar{A}$ – величина початкового натягу пружини регулювання, приведена до довжини кривошипа та жорсткості пружини; J_L – момент інерції лопаті; J_T – момент інерції відцентрових тягарців; l – довжина кривошипа механізму регулятора; i – число лопатей; φ – кут установки лопаті; φ_0 – початковий кут установки лопатей; Θ – кут між кривошипом і хордою лопаті; Ω – кут між

хордою лопаті й державками відцентрових тягарців; $F_{I_{P0}}$ – величина початкового натягу пружини регулювання; k – жорсткість пружини регулювання; $\Delta\varphi$ – кут між хордою лопаті й вектором моменту інерції лопаті; ρ – питома густина повітря.

Відповідно, вираз для параметра B для флюгерного регулювання набуде вигляду:

$$B = (J_P \cdot J_Z)^{-\frac{1}{3}} \times \left[J_P \left\{ \frac{k \cdot l^2}{i} \right. \right. \\ \left. \left. [\cos 2(\Theta - \varphi) + \sin(\Theta - \varphi) \cdot (\bar{A} + \sin(\Theta - \varphi_0))] + \omega^2 [J_L \cdot \cos 2(\varphi + \Delta\varphi) + J_T \cdot \cos 2(\Omega - \varphi)] \right\} - \right. \\ \left. - K \frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^4 \cdot V \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial Z} \right] \times \\ \times \left[\frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^3 \cdot V^2 \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial \varphi} - \right. \\ \left. [J_L \cdot \omega \cdot \sin 2(\varphi + \Delta\varphi) - J_T \cdot \omega \cdot \sin 2(\Omega + \varphi)] - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^4 \cdot V \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial Z} \left\{ \frac{k \cdot l^2}{i} + \right. \right. \\ \left. \left. [\cos 2(\Theta - \varphi) + \sin(\Theta - \varphi) \cdot (\bar{A} + \sin(\Theta - \varphi_0))] + \omega^2 [J_L \cdot \cos 2(\varphi + \Delta\varphi) + J_T \cdot \cos 2(\Omega - \varphi)] \right] \right]^{-\frac{2}{3}}. \quad (4)$$

Вираз для параметра A для антифлюгерного регулювання набуде вигляду:

$$A = (J_P \cdot J_Z)^{-\frac{2}{3}} \times \left(J_P \cdot K - J_Z \frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^4 \cdot V \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial Z} \right) \times \left[-\frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^3 \cdot V^2 \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial \varphi} + \right. \\ \left. [J_L \cdot \omega \cdot \sin 2(\varphi + \Delta\varphi) + J_T \cdot \omega \cdot \sin 2(\Omega + \varphi)] + \right. \\ \left. \frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^4 \cdot V \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial Z} \left\{ \frac{k \cdot l^2}{i} + \right. \right. \\ \left. \left. [\cos 2(\Theta + \varphi) + \sin(\Theta + \varphi) \cdot (\bar{A} + \sin(\Theta + \varphi_0))] + \omega^2 [J_L \cdot \cos 2(\varphi + \Delta\varphi) + J_T \cdot \cos 2(\Omega + \varphi)] \right] \right]^{-\frac{1}{3}}, \quad (5)$$

та, відповідно, вираз для параметра B для антифлюгерного регулювання:

$$B = (J_P \cdot J_Z)^{-\frac{1}{3}} \times \left[-J_P \left\{ \frac{k \cdot l^2}{i} \right. \right. \\ \left. \left. [\cos 2(\Theta + \varphi) + \sin(\Theta + \varphi) \cdot (\bar{A} + \sin(\Theta + \varphi_0))] + \omega^2 [J_L \cdot \cos 2(\varphi + \Delta\varphi) + J_T \cdot \cos 2(\Omega + \varphi)] \right\} - \right.$$

$$\begin{aligned}
& -K \frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^4 \cdot V \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial Z} \Bigg] \times \\
& \times \left[-\frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^3 \cdot V^2 \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial \varphi} \right. \\
& [J_L \cdot \omega \cdot \sin 2(\varphi + \Delta\varphi) + J_T \cdot \omega \cdot \sin 2(\Omega + \varphi)] + \\
& + \frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^4 \cdot V \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial Z} \left\{ \frac{k \cdot l^2}{i} \right. \\
& [\cos 2(\Theta + \varphi) + \sin(\Theta + \varphi) \cdot (\bar{A} + \sin(\Theta + \varphi_0))] + \\
& \left. \left. + \omega^2 [J_L \cdot \cos 2(\varphi + \Delta\varphi) + J_T \cdot \cos 2(\Omega + \varphi)] \right\} \right]^{-\frac{2}{3}}. \quad (6)
\end{aligned}$$

Якщо коефіцієнти A та B попадають в область III діаграми Вишнеградського, то параметри системи регулювання забезпечують необхідний процес регулювання. При цьому необхідно зауважити, що коефіцієнти A та B необхідно розраховувати для декількох точок діапазону регулювання. Якщо коефіцієнти A та B не попадають в потрібну область, то необхідно провести певне коригування параметрів системи регулювання. Якщо провести аналіз, то можна констатувати, що такі характеристики, як рушійний момент ротора $\bar{M}_P$ та, відповідно, частинні похідні $\frac{\partial \bar{M}_P}{\partial \varphi}$, $\frac{\partial \bar{M}_P}{\partial Z}$ ми не можемо змінювати, тому що вони пов'язані з геометричними параметрами лопаті та ротора. Такі параметри, як J_P та J_L , також практично неможливо змінити, оскільки вони пов'язані з конструкцією лопаті й ротора в цілому. В певних межах можна варіювати параметрами відцентрового регулятора, тобто зміною моменту інерції відцентрових тягарців, жорсткості пружини регулювання, кутів установки кривошипа та відцентрових тягарців. При неможливості варіюванням вищезгаданими параметрами забезпечити потрібний перехідний процес виникає необхідність введення додаткового елемента демпфування в систему регулювання.

Величину додаткового коефіцієнта моменту демпфування можна розрахувати, якщо задати необхідне значення одного з коефіцієнтів A чи B з діаграми Вишнеградського. Для цього необхідно встановити функціональну залежність між коефіцієнтами A та B і нанести її, відповідно, на діаграму Вишнеградського, після чого можна вибрати необхідне значення одного з коефіцієнтів, яке буде забезпечувати необхідний перехідний процес.

Отримаємо значення коефіцієнта K із формули (1) та, відповідно, запишемо:

$$K = \frac{1}{J_P} \left[A \cdot (J_P J_Z)^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt[3]{m_1 n_2 - m_2 n_1} - J_Z m_1 \right]. \quad (7)$$

Підставимо вираз (7) в формулу (2) й отримаємо функціональну залежність коефіцієнта B від A при зміні параметра K , тобто:

$$B = (J_P J_Z)^{-\frac{1}{3}}$$

$$\begin{aligned}
& \left\{ J_P n_2 + \frac{m_1}{J_P} \left[A (J_P J_Z)^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt[3]{m_1 n_2 - m_2 n_1} - J_Z m_1 \right] \right\} \\
& \sqrt[3]{\frac{1}{(m_1 n_2 - m_2 n_1)^2}}. \quad (8)
\end{aligned}$$

Як видно з виразу (8), залежність між коефіцієнтами A та B є лінійною і достатньо двох точок щоб побудувати цю залежність на діаграмі Вишнеградського. Перша точка визначена при попередньому розрахунку коефіцієнтів. Позначимо її координати відповідно A_1 та B_1 . Збільшимо величину параметра K на величину ΔK і розрахуємо за формулами (3), (4), (5) та (6) другу точку на діаграмі з координатами A_2 та B_2 . Прямая PS , проведена через ці точки (рис. 3), і буде функціональною залежністю B від A при зміні параметра K .

Далі на лінії PS вибирається точка, яка лежить на потрібній ділянці діаграми з координатами A_Σ та B_Σ , та розраховується необхідна величина параметра K за формулою (7), яку позначимо відповідно K_Σ . Величина коефіцієнта моменту демпфування K_d , який необхідний для подальшого розрахунку пристрою демпфування, визначається як $K_d = K_\Sigma - K$. Відповідно, з урахуванням формули (7) та коефіцієнтів m_1 , m_2 , n_1 , n_2 матимемо K_d при флюгерному регулюванні:

$$\begin{aligned}
K_d &= \frac{A_\Sigma}{J_P} (J_P \cdot J_Z)^{\frac{2}{3}} \times \\
& \times \left[\frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^3 \cdot V^2 \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial \varphi} [J_L \cdot \omega \cdot \sin 2(\varphi + \Delta\varphi) - \right. \\
& - J_T \cdot \omega \cdot \sin 2(\Omega + \varphi)] - \frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^4 \cdot V \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial Z} \\
& \left\{ \frac{k \cdot l^2}{i} [\cos 2(\Theta - \varphi) + \sin(\Theta - \varphi) \times \right. \\
& \times (\bar{A} + \sin(\Theta - \varphi_0))] + \\
& \left. + \omega^2 [J_L \cdot \cos 2(\varphi + \Delta\varphi) + J_T \cdot \cos 2(\Omega - \varphi)] \right\} \Bigg]^{-\frac{1}{3}} - \\
& - \frac{J_Z}{J_P} m_1 - K, \quad (9)
\end{aligned}$$

та, відповідно, при антифлюгерному регулюванні:

$$\begin{aligned}
K_d &= \frac{A_\Sigma}{J_P} (J_P \cdot J_Z)^{\frac{2}{3}} \times \left[-\frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^3 \cdot V^2 \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial \varphi} + \right. \\
& + [J_L \cdot \omega \cdot \sin 2(\varphi + \Delta\varphi) + J_T \cdot \omega \cdot \sin 2(\Omega + \varphi)] + \frac{1}{2} \pi \cdot \rho \cdot R^4 \cdot V \frac{\partial \bar{M}_P}{\partial Z} \\
& \left\{ \frac{k \cdot l^2}{i} [\cos 2(\Theta + \varphi) + \sin(\Theta + \varphi) \times \right. \\
& \times (\bar{A} + \sin(\Theta + \varphi_0))] +
\end{aligned}$$

$$+ \omega^2 [J_L \cdot \cos 2(\varphi + \Delta\varphi) + J_T \cdot \cos 2(\Omega + \varphi)]^{\frac{1}{3}} - \frac{J_Z}{J_P} m_1 - K. \quad (10)$$

Аналогічні розрахунки необхідно провести для кількох точок діапазону регулювання та вибрати більше значення K_D .

Оскільки K_D зв'язаний з обертанням лопаті, то $K_D \frac{d\varphi}{dt} = M$. Якщо пристрій демпфування встановлюється безпосередньо на лопаті, то цей вираз достатній для його розрахунку. На практиці пристрій демпфування встановлюється, як показано на рис. 1, виразимо швидкість переміщення штока пристрою демпфування V_w і зусилля на штоку F у параметрах лопаті, тобто

$$V_w = l\eta \frac{d\varphi}{dt}, \quad F = \frac{iK_D \frac{d\varphi}{dt}}{l\eta}, \quad \text{та, відповідно, напишемо:}$$

$$\frac{F}{V_w} = i \frac{K_D}{(l\eta)^2}, \quad (11)$$

де η – передаточне відношення механізму від кривошипа до штока.

Розглянемо схему пристрою демпфування, показану на рис. 4.

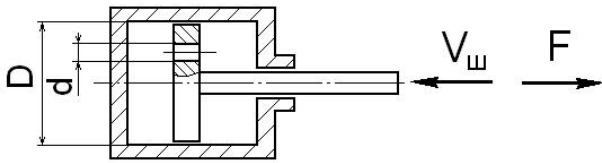


Рис. 4. Розрахункова схема пристрою демпфування

Fig. 4. Calculation scheme of the damping device

При швидкості руху поршня V_w його продуктивність буде:

$$Q_n = \frac{\pi D^2}{4} V_w,$$

де D – діаметр поршня.

Продуктивність робочої рідини, що протікає через отвори дроселя, складатиме [11]:

$$Q_{dp} = i' \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho'}},$$

де i' – кількість отворів дроселювання; μ – коефіцієнт подачі; d – діаметр отвору дроселя; Δp – перепад тиску на дроселі; ρ' – питома густина робочої рідини.

Виходячи з умови нерозривності потоку рідини $Q_n = Q_{dp}$ та враховуючи залежність $\Delta p = \frac{4F}{\pi D^2}$, можна записати:

$$V_w^2 = 8i'^2 \mu^2 \frac{d^4}{D^6} \frac{F}{\pi \rho'}. \quad (12)$$

Запишемо умову нерозривності потоку рідини як $d^2 V_{dp} = D^2 V_w$, звідси запишемо вираз для швидкості штока:

$$V_w = V_{dp} \frac{d^2}{D^2}, \quad (13)$$

де V_{dp} – швидкість протікання робочої рідини через отвір дроселя.

Підставивши у вираз (12) значення (13) та провівши перетворення, отримаємо:

$$\frac{F}{V_w} = \frac{\pi \rho' D^4}{8i'^2 \mu^2 d^2} V_{dp}.$$

З урахуванням (11) будемо мати вираз для розрахунку параметрів пристрою демпфування:

$$i \frac{K_D}{(l\eta)^2} = \frac{\pi \rho' D^4}{8i'^2 \mu^2 d^2} V_{dp}. \quad (14)$$

Параметри μ , d та V_{dp} можна прийняти за [11] та розрахувати діаметр поршня D пристрою демпфування:

$$D = \sqrt[4]{\frac{8i'^2 K_D i \mu^2 d^2}{\pi \rho' (l\eta)^2 V_{dp}}}. \quad (15)$$

Отримані вирази (3), (4), (5) та (6) для коефіцієнтів діаграми Вишнеградського дозволяють визначити вид перехідного процесу в системі регулювання ротора вітроустановки з відцентровим регулятором, а в разі, якщо параметри системи не забезпечують необхідний перехідний процес, можливе його коригування за рахунок введення додаткового демпфування, величину якого можна розрахувати за виразами (9) та (10). Вирази (14) та (15) дозволяють визначити параметри пристрою демпфування.

Висновки. 1. Отримані вирази для коефіцієнтів діаграми Вишнеградського для флюгерного та антифлюгерного регулювання, що дають змогу визначити вид перехідного процесу в системі регулювання ротора вітроустановки з відцентровим регулятором.

2. Встановлена лінійна залежність між коефіцієнтами діаграми Вишнеградського, що дозволяє визначити необхідну величину коефіцієнта демпфування, якщо параметри системи не забезпечують необхідний перехідний процес.

3. Отримані вирази для розрахунку параметрів пристрою демпфування.

ПОСИЛАННЯ

1. Erich Hau. Windkraftanlagen: Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit [Hardcover] Aerodynamik Energielieferung Energietechnik Regenerative Energie

- Rotor Rotorblätter Schwingung Strom Windenergie Windmühl. Springer Berlin Verlag. 2017. 997 c.
2. *Clemens Jauch*. Aflywheel in a wind turbine rotor for inertia control. *Wind Energy*. 2015. No. 18. P. 1645–1656.
 3. *Корендій В. М.* Аналіз впливу інерційних навантажень на процес відцентрового регулювання потужності вітроустановки. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2012. № 746. С. 132–139.
 4. *Коханевич В. П.* Динамічна стійкість системи регулювання ротора вітроустановки з відцентровим регулятором. *Відновлювана енергетика*. 2008. № 3 (14). С. 47–54.
 5. *Коханевич В. П.* Умови стійкості системи регулювання ротора вітроустановки з відцентровим регулятором при антифлюгерному регулюванні. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2011. № 2. С. 28–36.
 6. *Головко В. М., Коханевич В. П., Шихайлов М. О., Марченко Н. В.* Удосконалена математична модель відцентрового регулятора ротора вітроустановки при флюгерному регулюванні. *Відновлювана енергетика*. 2021. № 2 (65). С. 53–60.
 7. *Головко В. М., Коханевич В. П., Шихайлов М. О.* Удосконалена математична модель відцентрового регулятора ротора вітроустановки при антифлюгерному регулюванні. *Відновлювана енергетика*. 2022. № 1 (68). С. 73–78.
 8. *Головко В. М., Коханевич В. П., Шихайлов М. О.* Стійкість системи регулювання ротора вітроустановки з урахуванням удосконалених математичних моделей відцентрового регулятора. *Відновлювана енергетика*. 2022. № 3 (70). С. 36–43.
 9. *Коханевич В. П., Шихайлов М. О., Шкап С. С., Перехожук І. П.* Регулятор частоти обертання ротора. Патент України на корисну модель № 54700 від 25.11.2010. Бюл. № 22. 2010 р.
 10. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука. 1975. 768 с.
 11. *Абрамов Е. И., Колесниченко К. А., Маслов В. Т.* Элементы гидропривода. К.: Техніка, 1977. 320 с.
 3. *Korendiy V. M.* Analysis of the influence of inertial loads on the process of centrifugal regulation of wind turbine power [Analiz vplyvu inertsinykh navantazhen' na protses vidtsentrovoho rehulyuvannya potuzhnosti vitroustanovky]. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*. 2012. No. 746. Pp. 132–139. [in Ukrainian].
 4. *Kokhanovich V. P.* Dynamic Stability of the Wind Engine Rotor Control System with a Water-Center Regulator [Dynamichna stiykist' systemy rehulyuvannya rotora vitrodvyhuna z vidtsentrovym rehulyatorom]. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2008. No. 3 (14) Pp. 47–54. [in Ukrainian].
 5. *Kokhanovich V. P.* Stability conditions of the wind turbine rotor control system with a centrifugal regulator with anti-fluke control [Umovy stiykosti systemy rehulyuvannya rotora vitroustanovky z vidtsentrovym rehulyatorom pry antyflyuhernomu rehulyuvanni]. *Energy: economics, technologies, ecology*. 2011. No. 2. Pp. 28–36. [in Ukrainian].
 6. *Golovko V.M., Kokhanovich V.P., Shikhailov M.O., Marchenko N.V.* Advanced mathematical model of the centrifugal regulator of the wind rotor with vane control [Udoskonalena matematychna model' vidtsentrovoho rehulyatora rotora vitroustanovky pry flyuhernomu rehulyuvanni]. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2021. No. 2 (65). Pp. 53–60. [in Ukrainian].
 7. *Golovko V. M., Kokhanovich V. P., Shikhailov M. O.* Advanced mathematical model of the centrifugal regulator of the wind rotor with anti-fluke control [Udoskonalena matematychna model' vidtsentrovoho rehulyatora rotora vitroustanovky pry antiflyuhernomu rehulyuvanni]. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2022. No. 1 (68). Pp. 73–48. [in Ukrainian].
 8. *Golovko V. M., Kokhanovich V. P., Shikhailov M. O.* Stability of the wind turbine rotor regulation system taking into account improved mathematical models of the central regulator [Stiykist' systemy rehulyuvannya rotora vitroustanovky z urakhuvannyam udoskonalenykh matematychnykh modeley vidtsentrovoho rehulyatora]. *Vidnovlyuvana enerhetyka*. 2022. No. 3 (70). Pp. 36–43. [in Ukrainian].
 9. *Kokhanyevych V. P., Shykhaylov M. O., Shkap S. S., Perekhozhuk I. P.* Rotor speed regulator [Rehulyator chastoty obertannya rotora]. Patent of Ukraine for a utility model No. 54700 dated November 25, 2010. Bul. No. 22 of 2010. [in Ukrainian].
 10. *Besekersky V. A., Popov E. P.* Theory of automatic control systems [Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya]. M.: Nauka. 1975. 768 p. [in Russian].
 11. *Abramov E. I., Kolesnichenko K. A., Maslov V. T.* Elements of the hydraulic drive [Elementy gidroprivoda]. K.: Tekhnika. 1977. 320 p. [in Ukrainian].

REFERENCES

1. *Erich Hau*. Windkraftanlagen: Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit [Hardcover] Aerodynamik Energielieferung Energietechnik Regenerative Energie Rotor Rotorblätter Schwingung Strom Windenergie Windmühl. Springer Berlin Verlag. 2017. 997 p. [in German].
2. *Clemens Jauch*. Aflywheel in a wind turbine rotor for inertia control. *Wind Energy*. 2015. No. 18. Pp. 1645–1656. [in German].