

УДК 621.548

УДОСКОНАЛЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВІДЦЕНТРОВОГО РЕГУЛЯТОРА РОТОРА ВІТРОУСТАНОВКИ ПРИ АНТИФЛЮГЕРНОМУ РЕГУЛЮВАННІ

Отримано 7 жовт. 2021; рекомендовано до публікації 21 бер. 2022.
Доступно онлайн 24 квіт. 2022

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

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

Використання відцентрових регуляторів у вітроустановках (ВУ) малої потужності дозволяє спростити конструкцію установки але потребує враховувати специфіку регулювання. Так, для вітроустановок з флюгерним регулюванням була запропонована Г. Х. Сабініним конструкція відцентрового регулятора ГС-4 та його математична модель, яка в подальшому була удосконалена, та в Інституті відновлюваної енергетики НАН України була запропонована математична модель відцентрового регулятора ротора ВУ для антифлюгерного регулювання.

Розвиток технологічних можливостей дозволяє виготовляти лопаті з розширенням від її кінця до комеля в межах від 1:2 до 1:4 та з закрутом хорди лопаті до 30°, що дозволяє наблизити реальний профіль лопаті до розрахункового та отримати більш високий коефіцієнт використання енергії вітру ротором. Але при цьому відхилення напрямлення моменту інерції лопаті від хорди лопаті може сягати до 20°, що було враховано в останніх математичних моделях відцентрового регулятора ротора ВУ при флюгерному регулюванні. В цій роботі запропоновано удосконалену математичну модель відцентрового регулятора ротора вітроустановки при антифлюгерному регулюванні з урахуванням кута між хордою лопаті й вектором моменту інерції лопаті, що дало можливість отримати вираз для визначення статичних характеристик відцентрового регулятора з урахуванням даного параметру, а також уточнити вирази для визначення параметрів відцентрового регулятора, які використовуються при його налаштуванні для отримання необхідних номінальних обертів ротора вітроустановки. Бібл. 12, рис. 1.

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

ADVANCED MATHEMATICAL MODEL OF THE CENTRIFUGAL REGULATOR OF THE WIND ROTOR WITH ANTI-FLUGE CONTROL

Received 7 Oct. 2021; accepted 21 March 2022.
Available online 24 April 2022

V. Golovko¹, V. Kokhanevich², M. Shykhailov³

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

The use of centrifugal regulators in low-power wind turbines (VT) simplifies the design of the installation but requires consideration of the specifics of regulation. Thus, for wind turbine-controlled wind turbines, G. H. Sabinin proposed the design of the centrifugal regulator ГС-4 and its mathematical model, which was further improved, and the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine proposed a mathematical model of the centrifugal regulator of the rotor VT in anti-fluge control.

The development of technological capabilities allows to make blades with an extension from its end to the camel in the range from 1:2 to 1:4 and with a torsion of the blade chord up to 30°, which allows to bring the real profile of the blade clos-

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

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

³ наук. співроб.
<https://orcid.org/0000-0003-1845-9904>

^{1, 2, 3} Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 02094, вул. Гната Хоткевича 20А, м. Київ, Україна

¹ chief researcher, Institute of Renewable Energy at the NAS of Ukraine, 02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv <https://orcid.org/0000-0003-0195-9654>

² senior researcher, Institute of Renewable Energy at the NAS of Ukraine, 02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv <https://orcid.org/0000-0003-0033-1355>

³ researcher, Institute of Renewable Energy at the NAS of Ukraine, 02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv <https://orcid.org/0000-0003-1845-9904>

er to the calculated one. However, the deviation of the direction of the moment of inertia of the blade from the chord of the blade can reach 20°, which was taken into account in recent mathematical models of the centrifugal regulator of the rotor VT in anti-fluge control. This paper proposes an improved mathematical model of the centrifugal regulator of the rotor of the wind turbine with anti-weather control taking into account the angle between the chord of the blade and the vector of the inertia of the blade, which allowed to obtain an expression for determining the static characteristics of the centrifugal regulator, which are used in its adjustment to obtain the required nominal speed of the rotor of the wind turbine. Bibl. 12, fig. 1.

Keywords: wind power, wind turbine, centrifugal regulator of the rotor of the wind turbine.

Перелік використаних скорочень та позначень:

φ – кут установлення лопаті, профілю елемента лопаті
 φ_0 – початковий кут установлення лопаті
 i – кількість лопатей
 ω – кутова швидкість обертання ротора
 n – швидкість обертання ротора
 $\tilde{n}$ – відносна швидкість обертання ротора
 $n_{ном}$ – номінальна швидкість обертання ротора
 Θ – кут між кривошипом і хордою лопаті
 Ω – кут між хордою лопаті та державками відцентрових тягарців
 $\Delta\varphi$ – кут між хордою лопаті та вектором моменту інерції лопаті

J_T – момент інерції відцентрових тягарців
 J_L – момент інерції лопаті
 $F_{про}$ – величина початкового натягу пружини регулювання
 a – величина, яка характеризує величину початкового натягу пружини регулювання
 $\tilde{A}$ – величина початкового натягу пружини регулювання, приведена до довжини кривошипа та жорсткості пружини
 k – жорсткість пружини регулювання
 l – довжина кривошипа механізму регулятора n

Вступ. Відносно прості й недорогі відцентрові регулятори широко використовуються в різноманітних пристроях і механізмах для регулювання обертів та їх вимірювання [1]. Застосування цих регуляторів у вітроустановках (ВУ) малої потужності дає можливість [2–8] спростити конструкцію установки, забезпечити її надійну роботу в період експлуатації та знизити вартість установки в цілому. При цьому необхідно зазначити, що регулювання ВУ поворотом лопаті навколо її осі може здійснюватися двома способами: в бік збільшення кутів установки лопаті – флюгерне регулювання, або в бік зменшення кутів установки – антифлюгерне регулювання. Кожен вид регулювання має свої переваги та недоліки. Для вітроустановок з флюгерним регулюванням Г. Х. Сабініним була запропонована конструкція відцентрового регулятора ГС-4, а також його математична модель [2, 3], що була реалізована в різних установках, а саме: ВЭ-2; ВЭ-3; ВЭ-5 [4–6]. Подальші дослідження подібних систем регулювання були проведені в КБ «Шторм» при НТУУ «КПІ», в Інституті електродинаміки НАН України та в Інституті відновлюваної енергетики НАН України [7, 8]. Паралельно був розроблений ряд конструкцій відцентрових регуляторів для ВУ при антифлюгерному регулюванні, які були реалізовані при розробках установок АВЭУ-4, ВЕУ-2-4, АВЕ-4-7 та інших. У теоретичному плані у низці робіт було внесено ряд удосконалень до математичної моделі регулятора ГС-4 [9, 11], а також

розроблено математичну модель відцентрового регулятора ротора ВУ при антифлюгерному регулюванні [10].

Постановка завдання. Розвиток технологічних можливостей виготовлення лопатей для вітроустановок суттєво вплинув на конструкцію та геометрію лопаті. Тепер тенденція виготовлення лопаті спрямована на отримання максимального коефіцієнта використання енергії вітру ротором і, відповідно, максимального наближення реального профілю лопаті до розрахункового. Тобто в сучасних лопатях використовують розширення лопаті від кінця до комеля в межах від 1:2 до 1:4, і закрут лопаті сягає 30°. Тож відхилення напрямлення моменту інерції лопаті від хорди лопаті може складати до 20°, що було враховано в останніх математичних моделях відцентрового регулятора ротора ВУ при флюгерному регулюванні.

На сьогодні в математичній моделі відцентрового регулятора ротора ВУ при антифлюгерному регулюванні, що наведена в [10], не враховане відхилення напрямлення моменту інерції лопаті від її хорди. Без урахування цього відхилення дана математична модель відцентрового регулятора є недостатньо правомірною, що призведе до неправильних розрахунків параметрів регулятора та незадовільної роботи ВУ, і тому потребує свого вдосконалення.

Результати досліджень. Як було зазначено в роботах [2, 3], статичний стан вітроустановки при регулюванні обертів ротора поворотом лопаті навколо її осі описується двома рівняннями. Перше є умовою рівноваги між рушійним моментом ротора вітроустановки і моментом навантаження $M_P = M_H$. Друге – умова рівноваги всіх моментів, що обертають лопать відносно своєї осі. Повний вигляд цього рівняння такий:

$$M_A + M_B + M_{Пр} + M_{Тр} = 0, \quad (1)$$

де M_A – момент аеродинамічних сил, що діють на лопать;

M_B – момент відцентрових сил;

$M_{Пр}$ – момент пружини, приведений до осі лопаті;

$M_{Тр}$ – момент тертя.

У роботах [9, 10] був проведений аналіз величин моментів аеродинамічних сил та моменту тертя, а також їхнього впливу на роботу регулятора і прийняті припущення, що: $M_A = 0$; $M_{Тр} = 0$. У цьому разі також використані згадані припущення, що отримали експериментальне підтвердження [12].

На рис. 1 наведена схема моментів, що обертають лопать навколо її осі сил при антифлюгерному регулюванні.

При такому регулюванні кути установлення лопаті зменшуються, тому, відповідно, моменти, що діють в напрямку зменшення кута установлення, будуть додатними, а в протилежному напрямку – від'ємними.

Момент пружини, приведений до осі лопаті, як і при флюгерному регулюванні, не відрізняється від

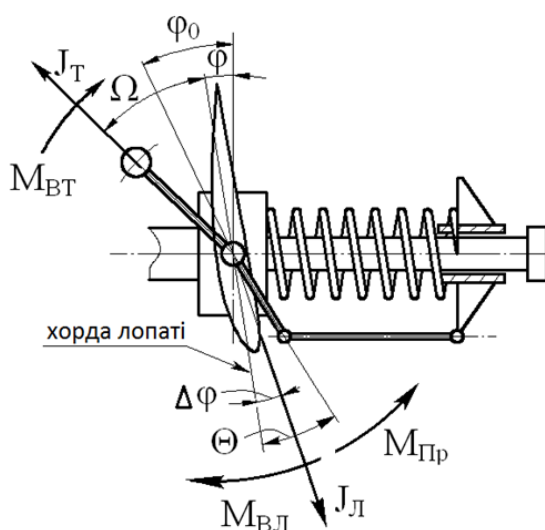


Рис. 1. Схема моментів, що обертають лопать при антифлюгерному регулюванні

Fig. 1. The scheme of the moments rotating a blade at antiflue adjustment

аналогічного моменту для математичних моделей відцентрового регулятора, наведеного в [10] і складе:

$$M_{Пр} = -\frac{k}{i} \{a + l [\sin \mu_0 - \sin(\mu_0 - (\varphi_0 - \varphi))] \} \cdot l \cdot \cos(\mu_0 - (\varphi_0 - \varphi)), \quad (2)$$

де $a = \frac{F_{Пр0}}{k}$ – величина, що характеризує величину початкового натягу пружини регулювання;

$F_{Пр0}$ – величина початкового натягу пружини регулювання;

k – жорсткість пружини регулювання;

i – кількість лопатей;

φ – кут установлення лопаті (поточний);

φ_0 – початковий кут установлення лопаті;

μ_0 – кут між кривошипом і площиною обертання ротора при φ_0 (μ_0 є початковим кутом встановлення кривошипа);

l – довжина плеча кривошипа механізму регулятора.

Кут між кривошипом і хордою лопаті, як і при флюгерному регулюванні [11], позначимо Θ , тоді можна записати:

$$\Theta = \mu_0 - \varphi_0, \quad (3)$$

а також

$$\mu_0 = \Theta + \varphi_0, \quad (4)$$

Відповідно, з урахуванням виразів (3) та (4), вираз для $M_{Пр}$ буде мати такий вигляд:

$$M_{Пр} = -\frac{k}{i} \{a + l \cdot [\sin(\Theta + \varphi_0) - \sin(\Theta + \varphi)] \} \cdot l \cdot \cos(\Theta + \varphi). \quad (5)$$

Аналогічно, як і при флюгерному регулюванні, момент відцентрових сил системи регулювання складається з суми відцентрових моментів тягарців та лопаті:

$$M_B = M_{ВТ} + M_{ВЛ}. \quad (6)$$

Момент відцентрових сил лопаті дорівнюватиме:

$$M_{ВЛ} = \frac{1}{2} J_L \cdot \omega^2 \cdot \sin 2(\varphi + \Delta\varphi), \quad (7)$$

де J_L – момент інерції лопаті;

ω – кутова швидкість обертання ротора;

$\Delta\varphi$ – кут між хордою лопаті й вектором моменту інерції лопаті.

У роботі [11] було вказано, що з урахуванням аеродинамічних розрахунків геометричний закрут лопаті при флюгерному регулюванні направлений на збільшення кута φ . В цьому разі це положення зберігається і відображено на рис. 1.

Момент відцентрових сил тягарців:

$$M_{BT} = \frac{1}{2} J_T \cdot \omega^2 \cdot \sin 2(\gamma_0 - (\varphi_0 - \varphi)), \quad (8)$$

де J_T – момент інерції відцентрових тягарців;

γ_0 – кут між державками тягарців і площиною обертання ротора при φ_0 .

Як і в попередніх роботах [9–11], позначимо кут між хордою лопаті й державками тягарців через Ω , тоді можна записати:

$$\gamma_0 = \Omega + \varphi_0. \quad (9)$$

Відповідно, з урахуванням (9), вираз для M_{BT} набуде вигляду:

$$M_{BT} = \frac{1}{2} J_T \cdot \omega^2 \cdot \sin 2(\Omega + \varphi). \quad (10)$$

З урахуванням (7) та (10) запишемо вираз для моменту відцентрових сил системи регулювання (6) як:

$$M_B = \frac{1}{2} \omega^2 \cdot [J_L \cdot \sin 2(\varphi + \Delta\varphi) + J_T \cdot \sin 2(\Omega + \varphi)]. \quad (11)$$

Після підставлення значень відповідних моментів, що розраховані за формулами (5) та (11), у вираз (1) отримаємо:

$$\begin{aligned} & \frac{k}{i} \{a + l \cdot [\sin(\Theta + \varphi_0) - \sin(\Theta + \varphi)]\} \cdot l \\ & \cdot \cos(\Theta + \varphi) = \\ & = \frac{1}{2} \omega^2 \cdot [J_T \cdot \sin 2(\Omega + \varphi) + J_L \cdot \sin 2(\varphi + \Delta\varphi)]. \quad (12) \end{aligned}$$

Розв'язуючи рівняння (12) відносно ω , та з урахуванням виразу $\omega = \frac{\pi n}{30}$ отримаємо вираз для визначення статичної характеристики відцентрового регулятора при антифлюгерному регулюванні:

$$n = \frac{30}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2k \cdot \{a + l \cdot [\sin(\Theta + \varphi_0) - \sin(\Theta + \varphi)]\} \cdot l \cdot \cos(\Theta + \varphi)}{i \cdot [J_T \cdot \sin 2(\Omega + \varphi) + J_L \cdot \sin 2(\varphi + \Delta\varphi)]}} \quad (13)$$

Для конкретного регулятора, як і при флюгерному регулюванні [11], J_T, J_L, i, k, l є величинами, що не змінюються в процесі регулювання, а також не змінюються при налаштуванні відцентрового регулятора на необхідну величину номінальної швидкості обертання ротора $n_{ном}$, тобто можна винести їх з-під знака радикала, і тоді отримаємо:

$$n = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2k \cdot l^2}{i \cdot J_T} \cdot \frac{[\bar{A} + \sin(\Theta + \varphi_0) - \sin(\Theta + \varphi)] \cos(\Theta + \varphi)}{\sin 2(\Omega + \varphi) + \frac{J_L}{J_T} \cdot \sin 2(\varphi + \Delta\varphi)}} \quad (14)$$

де $\bar{A} = \frac{a}{l} = \frac{F_{\Pi p_0}}{k \cdot l}$ – величина початкового натягу пружини регулювання, що приведена до довжини кривошипа та жорсткості пружини.

Оскільки однією з умов налаштування відцентрового регулятора при антифлюгерному регулюванні, аналогічно, як і при флюгерному регулюванні, є умова, що $n = n_{ном}$ при $\varphi = \varphi_0$, то вираз для $n_{ном}$ набуде вигляду:

$$n_{ном} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2k \cdot l^2}{i \cdot J_T} \cdot \frac{\bar{A} \cdot \cos(\Theta + \varphi_0)}{\sin 2(\Omega + \varphi_0) + \frac{J_L}{J_T} \cdot \sin 2(\varphi_0 + \Delta\varphi)}}. \quad (15)$$

Для визначення параметрів регулятора для його налаштування на номінальні оберти подамо вираз (15) у такому вигляді:

$$n_{ном} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2l \cdot F_{\Pi p_0}}{i \cdot J_T} \cdot \frac{\cos(\Theta + \varphi_0)}{\sin 2(\Omega + \varphi_0) + \frac{J_L}{J_T} \cdot \sin 2(\varphi_0 + \Delta\varphi)}}. \quad (16)$$

Тоді вираз для визначення величини початкового натягу пружини при налаштуванні регулятора на $n_{ном}$ за рахунок зміни моменту інерції відцентрових тягарців (J_T) можна записати як

$$F_{\Pi p_0} = \frac{i \cdot \omega^2 \cdot J_T \cdot \sin 2(\Omega + \varphi_0) + \frac{J_L}{J_T} \cdot \sin 2(\varphi_0 + \Delta\varphi)}{2l \cdot \cos(\Theta + \varphi_0)}, \quad (17)$$

та, відповідно, вираз для визначення величини моменту інерції відцентрових тягарців при налаштуванні регулятора на $n_{ном}$ за рахунок зміни величини початкового натягу пружини $F_{\Pi p_0}$ буде:

$$J_T = \frac{2F_{\Pi p_0} \cdot l}{\omega^2 \cdot i} \cdot \frac{\cos(\Theta + \varphi_0)}{\sin 2(\Omega + \varphi_0)} - J_L \cdot \frac{\sin 2(\varphi_0 + \Delta\varphi)}{\sin 2(\Omega + \varphi_0)}. \quad (18)$$

Для апроксимації результатів на інші типорозміри даного регулятора вираз (14) у відносних величинах,

$$\bar{n} = \frac{n}{n_{ном}}$$

а саме з урахуванням, що

$$\bar{n} = K_M \cdot \sqrt{\frac{[\bar{A} + \sin(\Theta + \varphi_0) - \sin(\Theta + \varphi)] \cdot \cos(\Theta + \varphi)}{\sin 2(\Omega + \varphi) + \frac{J_L}{J_T} \cdot \sin 2(\varphi + \Delta\varphi)}}, \quad (19)$$

де K_M складе:

$$K_M = 1 / \sqrt{\frac{\bar{A} \cdot \cos(\Theta + \varphi_0)}{\sin 2(\Omega + \varphi_0) + \frac{J_L}{J_T} \cdot \sin 2(\varphi_0 + \Delta\varphi)}}. \quad (20)$$

Вирази (19) та (20) дозволяють отримати статичні характеристики відцентрового регулятора при антифлюгерному регулюванні у відносних координатах при таких параметрах регулятора: кута між хордою лопаті й вектором моменту інерції лопаті; кута між хордою лопаті й державками відцентрових тягарців; кута між кривошипом і хордою лопаті; жорсткості

пружини регулювання (визначається параметром $\bar{A}$) – при різних співвідношеннях моментів інерції лопаті та відцентрових тягарців.

Висновок. Запропоновано вдосконалену математичну модель відцентрового регулятора ротора вітроустановки при антифлюгерному регулюванні з урахуванням кута між хордою лопаті й вектором моменту інерції лопаті, що дало можливість отримати вираз для визначення статичних характеристик відцентрового регулятора та уточнити вирази для визначення параметрів відцентрового регулятора, що використовуються при його налаштуванні для отримання необхідних номінальних обертів ротора вітроустановки, з урахуванням даного параметра.

ПОСИЛАННЯ

1. Л. М. Цукерник, *Теория и расчет центробежного регулятора*. Москва, росія: Машгиз, 1951.
2. Г. Х. Сабинин, “Теория регулирования быстроходных ветродвигателей поворотом лопастей центробежным регулятором”, *Промышленная аэродинамика*, No. 8, с. 5–77, 1957.
3. Г. Х. Сабинин, “Теория регулирования быстроходных ветряков центробежным регулятором с помощью поворота лопастей”, *Вопросы энергетики*, с. 37–49, 1959.
4. Я. И. Шефтер, И. В. Рождественский, *Ветроэнергетические и ветроэлектрические агрегаты*. Москва, росія: Колос, 1967.
5. Я. И. Шефтер, *Использование энергии ветра*, Москва, росія: Энергоатомиздат, 1983.
6. С. Б. Перли, *Быстроходные ветряные двигатели*. Москва, Ленинград, росія: ГЭИ. 1951.
7. В. И. Коваленко, В. П. Коханевич, Н. А. Шихайлов, “Ветроэлектрическая установка мощностью 2 кВт.”, *Энергетика и электрификация*, No. 4, с. 37–40, 1991.
8. В. И. Коваленко, В. П. Коханевич, Н. А. Шихайлов, “Ветроэнергетические установки малой мощности”, *Энергетика и электрификация*, No. 1, с. 43–46, 1993.
9. В. П. Коханевич, “Статичні характеристики відцентрового регулятора при флюгерному регулюванні ротора вітродвигуна”, *Відновлювана енергетика*, No. 1 (12), с. 39–44, 2008.
10. В. П. Коханевич, “Статика регулювання роторів вітродвигунів відцентровими регуляторами при антифлюгерному регулюванні”, *Відновлювана енергетика*, No. 3 (18), с. 18–24, 2009.

11. В. М. Головки, В. П. Коханевич, М. О. Шихайлов, Н. В. Марченко, “Удосконалена математична модель відцентрового регулятора ротора вітроустановки при флюгерному регулюванні”, *Відновлювана енергетика*, No. 2 (65), с. 53–60, 2021. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2\(65\).53-60](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2(65).53-60)
12. В. М. Головки, В. П. Коханевич, М. О. Шихайлов, “Експериментальні дослідження відцентрових регуляторів для вітроустановок”, *Відновлювана енергетика*, No. 3 (54), с. 31–45, 2018.

REFERENCES

1. L. M. Tsukernyk, *Theory and calculation of a centrifugal regulator* (in Russian). Moscow, Russia: Mashgiz, 1951.
2. G. H. Sabinin, Theory of regulation of high-speed wind turbines by turning blades by a centrifugal regulator (in Russian), *Promyshlennaya Aerodinamika*, Sb. No. 8, pp. 5–77, 1957.
3. G. H. Sabinin, The theory of regulation of high-speed windmills by a centrifugal regulator by means of rotation of blades (in Russian), *Voprosy energetiki*, pp. 37–49, 1959.
4. Ya. I. Shefter, and I. V. Rozhdestvensky, *Wind pump and wind power units* (in Russian). Moscow, Russia: Kolos, 1967.
5. Ya. I. Shefter, *The Use of wind energy* (in Russian). Moscow, Russia: Energoatomizdat, 1983.
6. S. B. Perli, *High-speed wind turbines* (in Russian). Moscow, Leningrad, Russia: GEI, 1951.
7. V. I. Kovalenko, V. P. Kokhanovich, and N. A. Shikhailov, “Wind power plant with a capacity of 2 kW.” *Energetika i Elektrifikatsiya* (in Ukrainian), No. 4, pp. 37–40, 1991.
8. V. I. Kovalenko, V. P. Kokhanovich, and N. A. Shikhailov, “Low power wind turbines” (in Ukrainian), *Energetika i Elektrifikatsiya*, No. 1, pp. 43–46, 1993.
9. V. P. Kokhanovich, “Static characteristics of the centrifugal regulator at weather vane regulation of the rotor of the wind turbine” (in Ukrainian), *Vidnovlyuvana Enerhetyka*, No. 1 (12), pp. 39–44, 2008.
10. V. P. Kokhanovich, “Statics of regulation of wind turbine rotors by centrifugal regulators at antiflue control” (in Ukrainian), *Vidnovlyuvana Enerhetyka*, No. 3 (18), pp. 18–24, 2009.
11. V. M. Golovko, V. P. Kokhanovich, M. O. Shikhailov, and N. V. Marchenko, “Improved mathematical

- model of the centrifugal regulator of the wind turbine rotor with weather vane control" (in Ukrainian), *Vidnovlyuvana Enerhetyka*, No. 2 (65), pp. 53–60, 2021. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2\(65\).53-60](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2(65).53-60)
12. V .M. Golovko, V. P. Kokhanevich, M. O. Shikhailov, "Experimental studies of centrifugal regulators for wind turbines" (in Ukrainian), *Vidnovlyuvana Enerhetyka*, No. 3 (54), pp. 31–45, 2018.