

УДК 621.548

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДЦЕНТРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ ВІТРОУСТАНОВОК

В.М. Головко, професор, доктор технічних наук, **В.П. Коханевич**, кандидат технічних наук, **М.О. Шихайлов**

Інститут відновлюваної енергетики НАН України
02094 м. Київ, вул. Гната Хоткевича, 20А.

Наведено результати експериментальних досліджень відцентрового регулятора роторів вітроустановок для його різних параметрів при статичних і динамічних навантаженнях та проведено їхнє співставлення з теоретичними положеннями. Бібл. 10, рис. 15.

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

EXPERIMENTAL RESEARCH OF CENTRIFUGAL REGULATORS FOR WIND TURBINE

V. Holovko, doctor of technical sciences, **V. Kokhanievych**, candidate of technical sciences, **M. Shykhailov**

Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine
02094, 20A Hnata Khotkevycha Street, Kyiv, Ukraine.

The results of experimental investigations of the centrifugal regulator of rotors of wind turbines under various parameters at static and dynamic loads are presented and their comparison with theoretical positions is carried out. Bibl 10, fig. 15.

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



В.М. Головко
V. Holovko

Відомості про автора: провідний науковий співробітник Інституту відновлюваної енергетики НАН України.

Освіта: закінчив в 1977 р. Українську сільськогосподарську академію за спеціальністю «Електрифікація сільського господарства».

Наукова сфера: відновлювані джерела енергії, вітроенергетика, вітроустановки малої потужності, автономні системи енергозабезпечення.

Публікації: 145.

ORCID: 0000-0003-0195-9654

Контакти: +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Information about the author: chief researcher at Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.

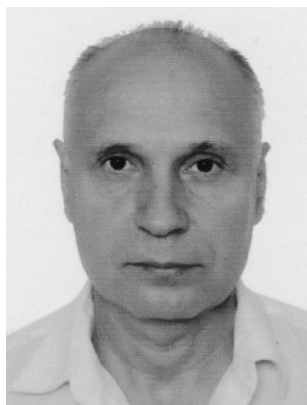
Education: graduated from the Ukrainian Agricultural Academy in 1977 with a degree in electrification of agriculture.

Research area: renewable sources of energy, wind power systems, small capacity wind units, autonomous power systems.

Publications: 145.

ORCID: 0000-0003-0195-9654

Contacts: +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net



В.П. Коханевич
V. Kokhanievych

Відомості про автора: старший науковий співробітник Інституту відновлюваної енергетики НАН України.

Освіта: закінчив в 1979 р. Київський політехнічний інститут за спеціальністю «Технологія машинобудування, металорізучі верстати та інструменти».

Наукова сфера: вітроенергетика, вітроустановки малої потужності, системи регулювання та захисту.

Публікації: 121.

ORCID: 0000-0003-0033-1355

Контакти: +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Information about the author: research fellow at Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.

Education: graduated from the Kyiv Polytechnic Institute in 1979 with a degree in technology of machine building, metal cutting machines and tools.

Research area: power systems, converting types of energy, automation and modeling processes, wind power systems, small capacity wind units, control systems and protect.

Publications: 121.

ORCID: 0000-0003-0033-1355

Contacts: +38 (044) 206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net



М.О. Шихайлов
M. Shykhailov

Відомості про автора: науковий співробітник Інституту відновлюваної енергетики НАН України.

Освіта: закінчив в 1979 р. Київський політехнічний інститут за спеціальністю «Гідропневмоавтоматика та гідропривід».

Наукова сфера: вітроенергетика, вітроустановки малої потужності, системи управління.

Публікації: 191.

ORCID: 0000-0003-1845-9904

Контакти: +38 (044) 206-28-09

e-mail: renewable@ukr.net

Information about the author: researcher at Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.

Education: graduated from the Kyiv Polytechnic Institute in 1979 with a degree in hydro-pneumatic and hydraulic drive.

Research area: wind power systems, small capacity wind units, control systems.

Publications: 191.

ORCID: 0000-0003-1845-9904

Contacts: +38 (044) 206-28-09

e-mail: renewable@ukr.net

Перелік використаних позначень та скорочень:

V	– швидкість повітряного потоку, що набігає на ротор;	M_H	– момент навантаження;
V_H	– номінальна швидкість повітряного потоку;	$M_{ном}$	– номінальний момент навантаження;
$\bar{V}$	– відносна швидкість повітряного потоку;	n	– швидкість обертання ротора;
J_T	– момент інерції відцентрових тягарців;	$n_{ном}$	– номінальні оберти ротора;
J_L	– моменту інерції лопаті;	$\bar{n}$	– відносні оберти ротора;
$F_{пp_0}$	– величина початкового натягнення пружини регулювання;	Θ	– кут між кривошипом і хордою лопаті;
$\bar{A}$	– параметр, що характеризує величину початкового натягнення пружини регулювання;	Ω	– кут між хордою лопаті і державками відцентрових тягарців.

Вступ. Широке впровадження вітроустановок малої потужності [1–3] ставить ряд вимог до їхніх конструкцій. Враховуючи те, що ці установки працюють в безпосередній близькості до житлових приміщень, на перший план виходять безпека та надійність, які прямо залежать від наявних систем регулювання обертів та потужності. Системи регулювання з використанням відцентрових регуляторів забезпечують достатню надійність та є відносно нескладними за своєю конструкцією. Подальше удосконалення цього типу регуляторів потребує як теоретичних досліджень, так і їхніх експериментальних підтверджень.

Постановка завдання. Математичні моделі систем регулювання з відцентровими регуляторами та певні допущення, що використані в даних математичних моделях і наведені в роботах [4–9], потребують експериментальної перевірки. Для досліджень різних типів регуляторів роторів вітроустановок в Інституті відновлюваної енергетики НАН України було розроблено та виготовлено стенд та експериментальний ротор з

відцентровим регулятором [10], що дозволяє оцінити вплив сил тертя на роботу відцентрового регулятора, отримати статичні характеристики ротора вітроустановки для флюгерного та антифлюгерного регулювання і визначити відхилення обертів ротора при динамічних навантаженнях. В цій роботі отримані результати проаналізовані та співставленні з теоретичними положеннями.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 наведена експериментальна статична характеристика ротора та дані замірів при флюгерному регулюванні при таких параметрах відцентрового регулятора: кут між кривошипом і хордою лопаті – $\Theta = 52^\circ$; кут між хордою лопаті і державками відцентрових тягарців – $\Omega = 40^\circ$; момент інерції відцентрових тягарців – $J_T = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; величина початкового натягнення пружини регулювання – $F_{пp_0} = 30 \text{ Н}$; співвідношення моменту інерції лопаті J_L до моменту інерції відцентрових тягарців $J_T - J_L / J_T = 0,214$; момент навантаження M_H відповідає номінальному моменту наванта-

ження $M_{ном} - M_H = M_{ном}$ та $\bar{A}=0,3$, де $\bar{A}$ параметр, що характеризує величину початкового на-
тяжіння пружини регулювання (див. [5, 7]).

Швидкість вітру V доцільно виразити в без-
розмірній формі, тобто:

$$\bar{V} = \frac{V}{V_H}, \quad (1)$$

де V_H – номінальна швидкість повітряного потоку.

Відповідно, оберти регулятора також доціль-
но виразити в безрозмірних координатах, тобто

$$\bar{n} = \frac{n}{n_{ном}}, \quad (2)$$

де $n_{ном}$ – номінальні оберти ротора.

У відповідності з параметрами аеродинаміч-
ного стенду [10] $V_H = 3 \text{ м/с}$, $n_{ном} = 275 \text{ об/хв}$.

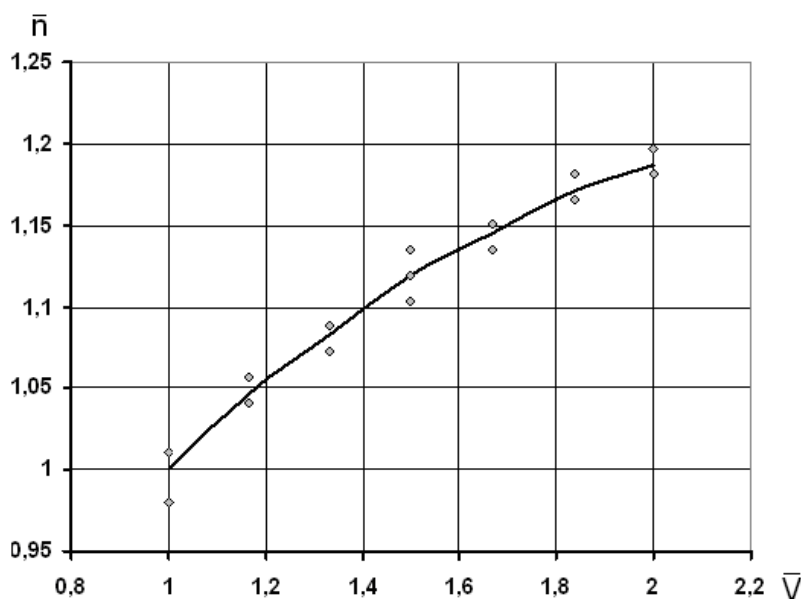


Рис. 1. Експериментальна статична характеристика ротора при флюгерному регулюванні.

Fig. 1. Experimental static characteristic of the rotor with floodgate regulation.

Дослідження впливу тертя в відцентровому регуляторі. На рис. 2 наведені статичні характе-
ристики ротора при дослідженні впливу сил тер-
тя на роботу відцентрового регулятора ($\Theta=52^\circ$;
 $\Omega=40^\circ$; $J_T=1,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $F_{IIp0}=40 \text{ Н}$; $\bar{A}=0,4$;
 $J_{II} / J_T=0,214$ та при $M_H=0$), де: 1 – статична ха-
рактеристика при збільшенні швидкості вітру; 2 –
статична характеристика при зменшенні швидко-
сті вітру.

Як видно з рис. 2, максимальна різниця між
статичними характеристиками ротора, заміряни-
ми при збільшенні та зменшенні швидкості пові-
тряного потоку, досягає при $\bar{V}=1,5$ і відповідно

складає $\Delta n = \frac{1,08 - 1,077}{1,08} = 0,0028$, або 0,28%, що

практично не впливає на точність регулювання.
Тобто допущення в математичних моделях [5, 7,
9], того що момент тертя в регуляторі допустимо
прийняти рівним 0, є правомірними.

Слід зауважити, що заміри проводилися за
відсутності моменту навантаження, тобто коли
регулятор найбільш чутливий до впливу тертя, а
при навантаженні ротора Δn зменшується. Крім
цього з рис. 2 видно, що зі збільшенням швидко-
сті вітру статичні характеристики зближуються,
тобто Δn , відповідно, зменшується.

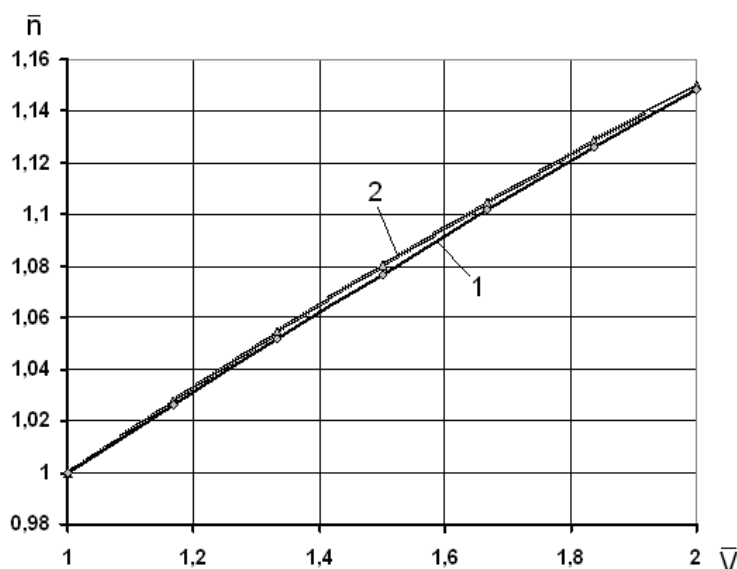


Рис. 2. Експериментальні статичні характеристики ротора при визначенні впливу тертя в відцентровому регуляторі.

Fig. 2. Experimental static characteristics of the rotor in determining the influence of friction in the centrifugal regulator.

Співставлення експериментальних та теоретичних статичних характеристик ротора. На рис. 3 наведені експериментальна та теоретична статичні характеристики при таких параметрах відцентрового регулятора: $\theta = 52^\circ$; $\Omega = 40^\circ$; $J_T = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $F_{\text{пр}0} = 30 \text{ Н}$; $\bar{A} = 0,3$; $J_L / J_T = 0,214$ та при $M_H = M_{\text{ном}}$, де: 1 – експериментальна статична характеристика; 2 – розрахункова статична характеристика.

Теоретично розрахована статична характеристика ротора зміщена вверх на величину

$\Delta n = 0,02$, оскільки як окремі точки характеристик співпадають.

Як видно з рис. 3, форми характеристик є подібними. Відхилення обертів для одної та іншої статичної характеристики для даного діапазону зміни швидкості вітру складає: для теоретичної – 1,1889; для експериментальної – 1,1865, що в відносних одиницях складає $\Delta n = (1,1889 - 1,1865) / 1,1889 = 0,0127 = 1,27\%$ та підтверджує правильність прийнятих допущень для моделі відцентрового регулятора. З урахування всього діапазону регулювання ($\bar{V} = 3 \div 4$) похибка буде складати 4÷5%.

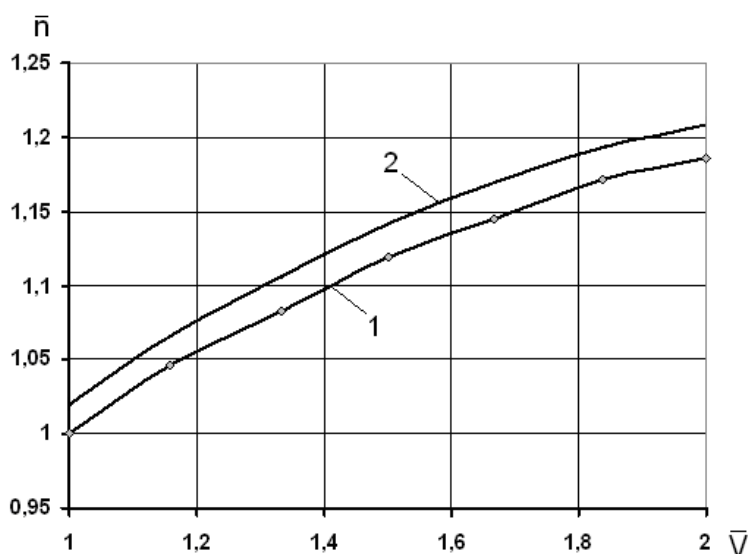


Рис. 3. Експериментальна та розрахункова статичні характеристики ротора при флюгерному регулюванні.

Fig. 3. Experimental and calculated static characteristics of the rotor with floodgun regulation.

На рис. 4 наведена експериментальна статична характеристика ротора та дані замірів при антифлюгерному регулюванні при таких параметрах відцентрового регулятора: $\Theta=52^\circ$; $\Omega=45^\circ$; $J_T=1,4 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; $F_{IIp0}=40$ Н; $\bar{A}=0,4$; $J_{II} / J_T=0,214$ та при $M_H = M_{ном}$.

На рис. 5 наведені теоретична та експериментальна статичні характеристики при антифлюгерному регулюванні при тих же параметрах відцентрового регулятора, що і на рис. 4, де: 1 – експериментальна статична характеристика; 2 – розрахункова статична характеристика.

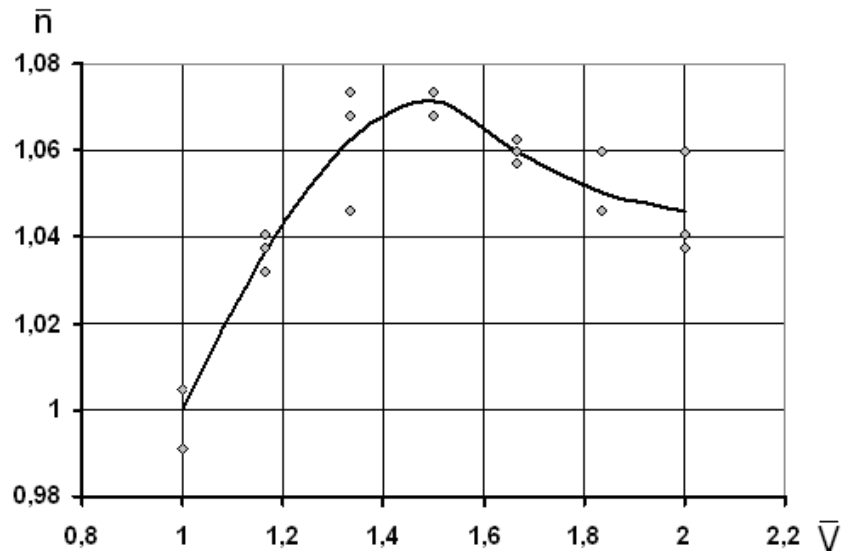


Рис. 4. Експериментальна статична характеристика ротора при антифлюгерному регулюванні.

Fig. 4. Experimental static characteristic of the rotor with anti-flood control.

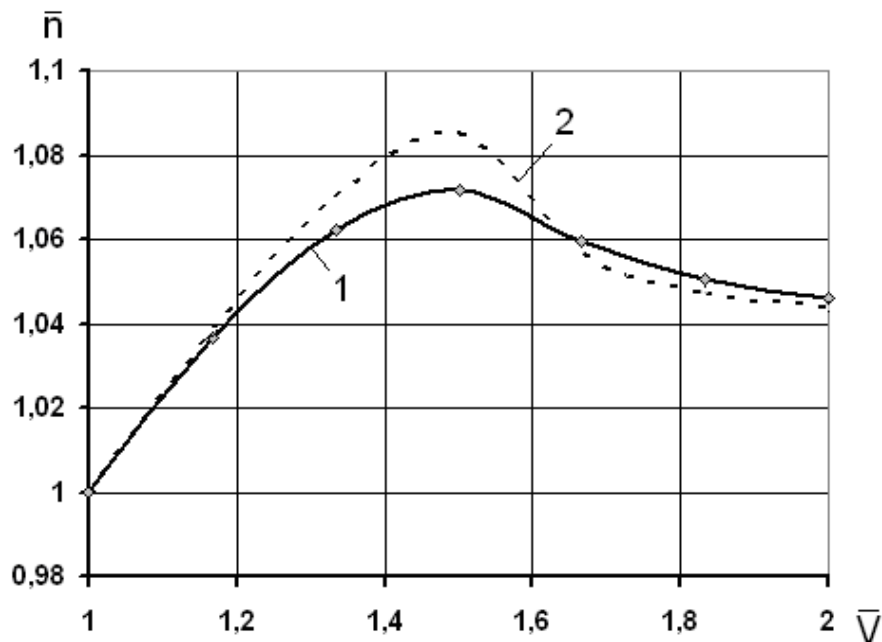


Рис. 5. Експериментальна та розрахункова статичні характеристики ротора при антифлюгерному регулюванні.

Fig. 5. Experimental and calculated static characteristics of the rotor with anti-flood control.

Як видно з рис. 5, експериментальна статична характеристика має найбільше відхилення від розрахункової за швидкості вітру $\bar{V}=1,5$, тобто в точці перегину характеристики. В процесі налагодження відцентрового регулятора початкові кути установлення лопаті неможливо виставити абсолютно однаково, крім цього, є певні відхилення в довжині тяг та радіусі кривошипа. Це призводить до того, що лопаті в точці $\bar{V}=1,5$ мають певну різницю в кутах установлення, а це, в свою чергу, призводить до зміщення точок перегину статичних характеристик окремих лопатей одна відносно іншої по осі $\bar{V}$ та є причиною того, що експериментальна статична характеристика ротора має більш плавний перегин, ніж теоретично розрахована.

Відносна величина відхилення експериментальної статичної характеристики від розрахункової складає

$$\Delta n = (1,085 - 1,071) / 1,085 = 0,0129 = 1,29\%.$$

Також необхідно зауважити, що на відміну

від флюгерного регулювання із збільшенням швидкості вітру розрахункова та експериментальна статичні характеристики зближуються.

Експериментальні статичні характеристики ротора при флюгерному регулюванні. На рис. 6 наведені статичні характеристики ротора при тих же параметрах відцентрового регулятора, що і на рис. 1, але при різних моментах навантаження, де: 1 – $M_H = M_{ном}$; 2 – $M_H = 0,5 M_{ном}$; 3 – $M_H = 0$.

Зменшення навантаження на роторі зміщує статичні характеристики ротора вгору, що співпадає з теоретичними статичними характеристиками наведеними в [5, 9].

На рис. 7 наведені статичні характеристики ротора при різних моментах інерції відцентрових тягарців при наступних параметрах відцентрового регулятора: $\Theta = 52^\circ$; $\Omega = 40^\circ$; $F_{ПР0} = 30$ Н;

$\bar{A} = 0,3$ та при $M_H = M_{ном}$,

де: 1 – $J_T = 1,0 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; 2 – $J_T = 1,4 \cdot 10^{-3}$ кг·м²;

3 – $J_T = 2,1 \cdot 10^{-3}$ кг·м².

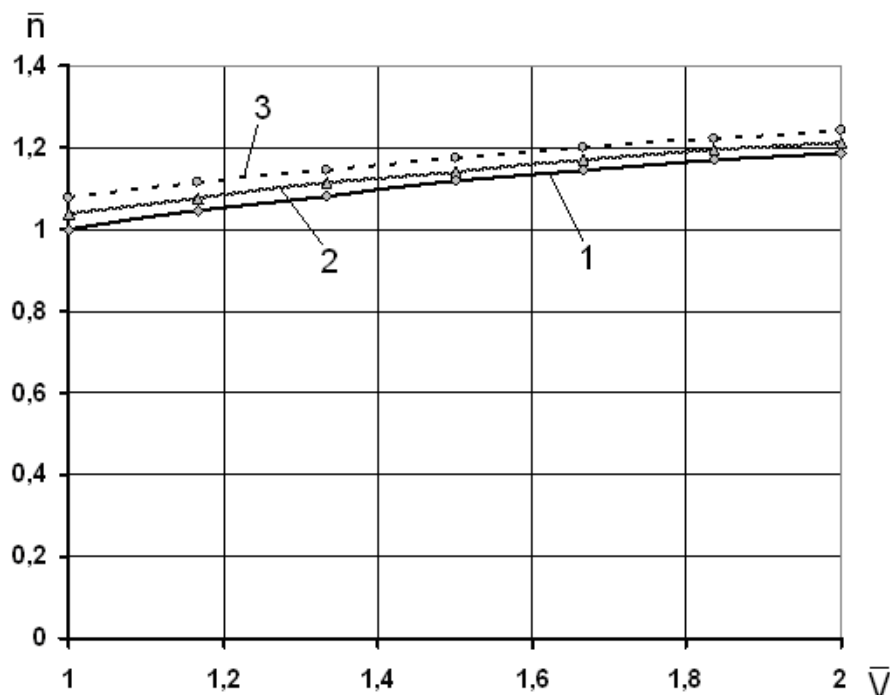


Рис. 6. Статичні характеристики ротора при флюгерному регулюванні при різних моментах навантаження.

Fig. 6. Static characteristics of the rotor with floodgate regulation at different load moments.

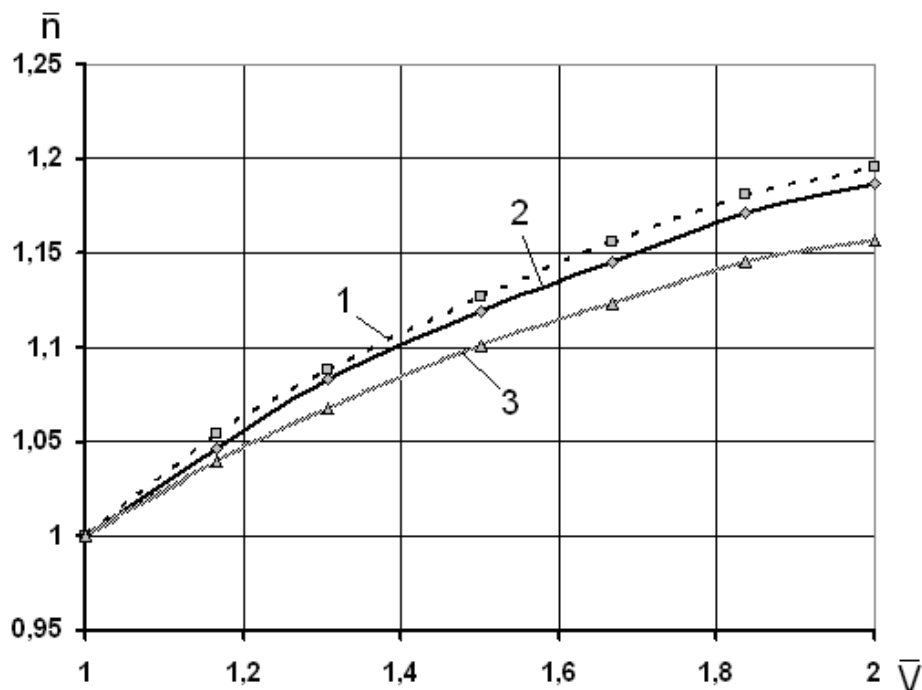


Рис. 7. Статичні характеристики ротора при флюгерному регулюванні при різних моментах інерції відцентрових тягарців.

Fig. 7. Static characteristics of the rotor with floodgun regulation at different moments of inertia of centrifugal gravity.

З урахуванням моменту інерції лопаті ($J_L = 0,3 \cdot 10^{-3}$) відношення J_L / J_T для різних моментів складає: для $J_T = 1,0 \cdot 10^{-3}$ – $J_L / J_T = 0,3$; для $J_T = 1,4 \cdot 10^{-3}$ – $J_L / J_T = 0,214$; для $J_T = 2,1 \cdot 10^{-3}$ – $J_L / J_T = 0,143$.

Як видно з рисунків наведених [5, 9], зменшення J_L / J_T зменшує кут нахилу статичної характеристики відцентрового регулятора та, відповідно, статичної характеристики ротора. Тобто, збільшення моменту інерції відцентрових тягарців зменшує кут нахилу статичної характеристики ротора, що підтверджується даними експерименту, які наведені рис. 7.

На рис. 8 наведені статичні характеристики при різних кутах встановлення відцентрових тягарців при наступних параметрах відцентрового регулятора: $\Theta = 52^\circ$; $J_T = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $F_{\Pi p_0} = 30 \text{ Н}$;

$\bar{A} = 0,3$; $J_L / J_T = 0,214$ та при $M_H = M_{\text{ном}}$, де: 1 – $\Omega = 40^\circ$; 2 – $\Omega = 60^\circ$; 3 – $\Omega = 80^\circ$.

Як видно з графіків, що наведені на рисунках, збільшення кута встановлення відцентрових тягарців зменшує кут нахилу статичної характеристики відцентрового регулятора та, відповідно, зменшує кут нахилу статичної характеристики ротора і підвищує точність регулювання, що співпадає з результатами експериментальних статичних характеристик, які показані на рис. 8.

На рис. 9 наведені статичні характеристики при різних величинах початкового натягіння пружини регулювання при наступних параметрах відцентрового регулятора: $\Theta = 52^\circ$; $\Omega = 40^\circ$; $J_T = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $\bar{A} = 0,3$; $J_L / J_T = 0,214$ та при $M_H = M_{\text{ном}}$, де: 1 – $F_{\Pi p_0} = 40 \text{ Н}$; 2 – $F_{\Pi p_0} = 30 \text{ Н}$; 3 – $F_{\Pi p_0} = 20 \text{ Н}$.

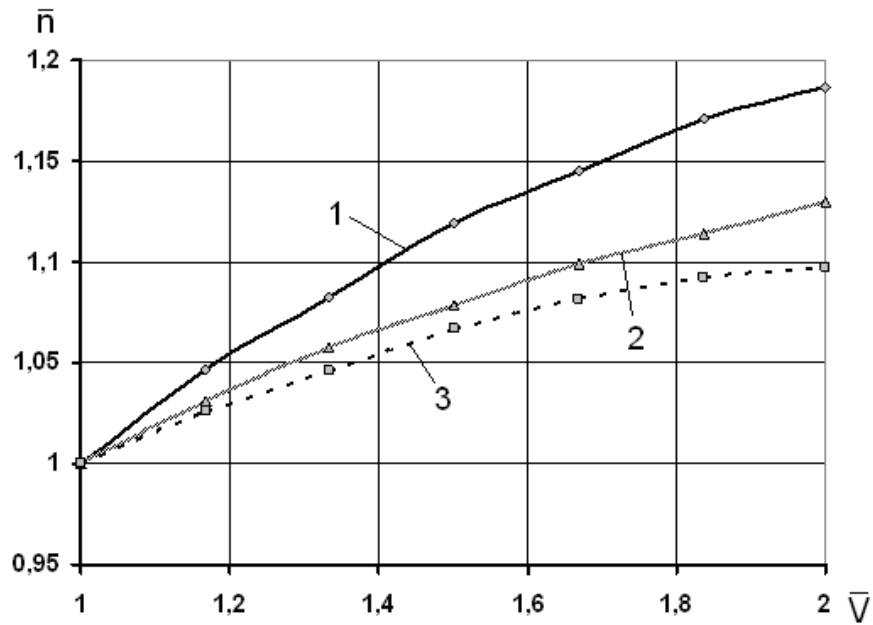


Рис. 8. Статичні характеристики ротора при флюгерному регулюванні при різних кутах встановлення відцентрових тягарців.

Fig. 8. Static characteristics of the rotor with floodgate regulation at different angles of centrifugal force setting.

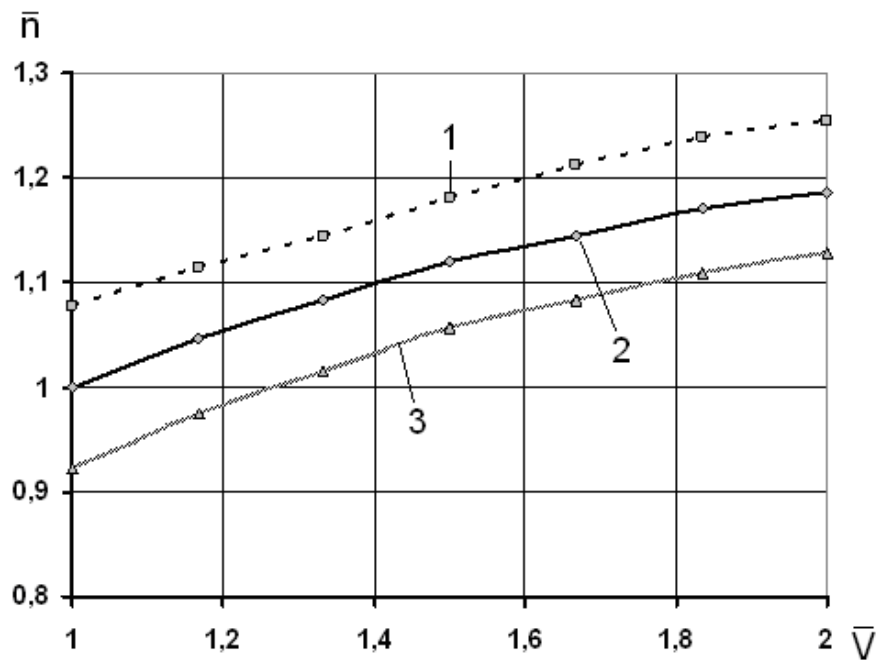


Рис. 9. Статичні характеристики ротора при флюгерному регулюванні при різних величинах початкового натягнення пружини регулювання.

Fig. 9. Static characteristics of the rotor with floodgate regulation at different values of the initial tension of the regulation spring.

Величина початкового натяжіння пружини регулювання входить в параметр $\bar{A}$ відцентрового регулятора та, відповідно, буде складати для: $F_{\Pi p_0}=40$ Н– $\bar{A}=0,4$; $F_{\Pi p_0}=30$ Н– $\bar{A}=0,3$; $F_{\Pi p_0}=20$ Н– $\bar{A}=0,2$. З графіків, наведених на рисунках, видно, що збільшення параметра $\bar{A}$ зменшує кут нахилу статичної характеристики відцентрового регулятора та, відповідно, зменшує кут нахилу статичної характеристики ротора. Але, оскільки діапазон зміни цього параметра незначний, то на експериментальних статичних характеристиках ротора практично не видно різниці в кутах нахилу статичних характеристик ротора. В [5] було вказано, що величина початкового натяжіння пружини регулювання викорис-

товується для налаштування регулятора на номінальні оберти, а тому експериментальні статичні характеристики для $\bar{A}=0,4$ та $\bar{A}=0,2$ не перераховувалися відносно до номінальних обертів, щоб показати вплив $F_{\Pi p_0}$ на них. З рис. 9 видно, що при таких параметрах відцентрового регулятора зміна величини початкового натяжіння пружини регулювання на ± 10 Н дозволяє змінювати оберти ротора в діапазоні $\pm 8\%$.

Експериментальні статичні характеристики ротора при антифлюгерному регулюванні. На рис. 10 наведені статичні характеристики ротора при тих же параметрах відцентрового регулятора, що і на рис. 4, але при різних моментах навантаження, де: 1 – $M_H = M_{ном}$; 2 – $M_H = 0,5 M_{ном}$; 3 – $M_H = 0$.

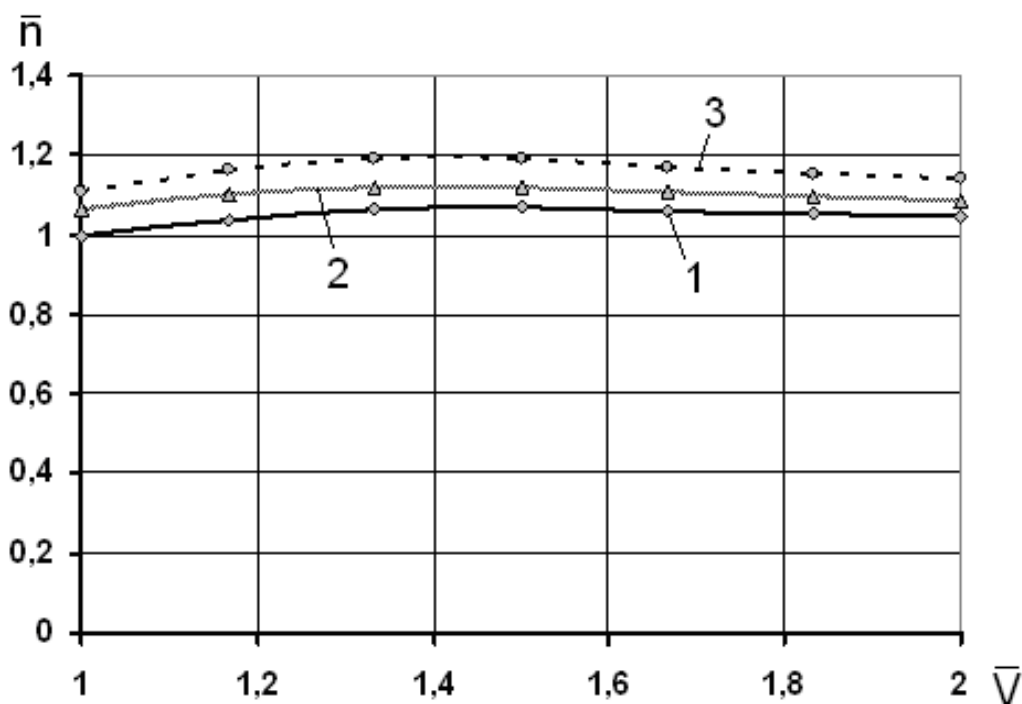


Рис. 10. Статичні характеристики ротора при анти флюгерному регулюванні при різних моментах навантаження.

Fig. 10. Static characteristics of the rotor with anti-flood control at different load moments.

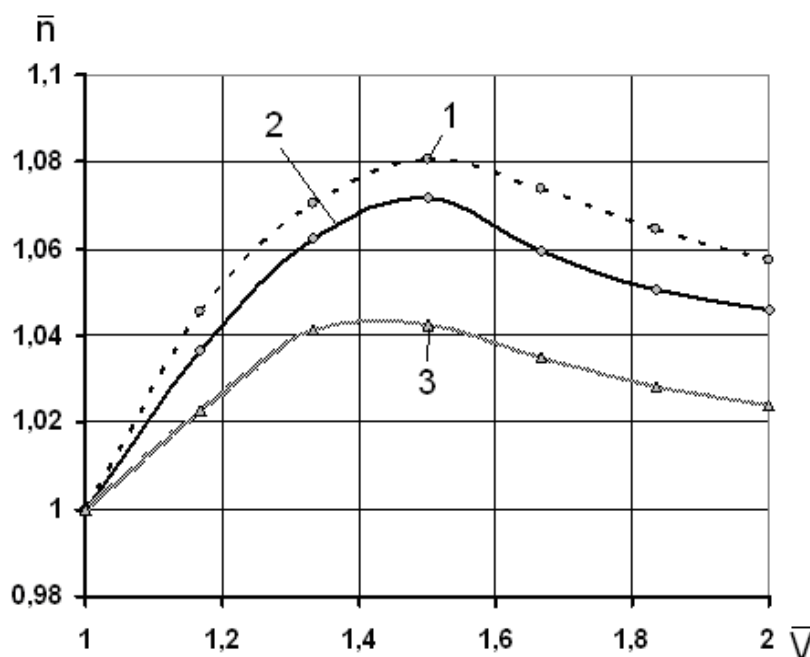


Рис. 11. Статичні характеристики ротора при антифлюгерному регулюванні при різних моментах інерції відцентрових тягарців.

Fig. 11. Static characteristics of the rotor with anti-flutter regulation at different moments of inertia of centrifugal gravity.

На рис. 11 наведені статичні характеристики ротора при різних моментах інерції відцентрових тягарців при наступних параметрах відцентрового регулятора: $\Theta=52^\circ$; $\Omega=45^\circ$; $F_{\Pi p_0}=40$ Н; $\bar{A}=0,4$ та при $M_H=M_{ном}$, де: 1 – $J_T=1,0 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; 2 – $J_T=1,4 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; 3 – $J_T=2,1 \cdot 10^{-3}$ кг·м².

Оскільки випробування при антифлюгерному регулюванні проводились при тих же моментах інерції лопаті та відцентрових тягарців, що і при флюгерному регулюванні, то параметри J_L / J_T залишаються такими ж. Як видно з рисунків [7, 9], зменшення J_L / J_T , або, відповідно, збільшення J_T , зменшує кут нахилу статичної характеристики відцентрового регулятора та згладжує статичну характеристику ротора, що підтверджується даними експерименту, які показані на рис. 11.

На рис. 12 наведені статичні характеристики при різних кутах встановлення відцентрових тягарців при таких параметрах відцентрового регулятора: $\Theta=52^\circ$; $J_T=1,4 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; $F_{\Pi p_0}=40$ Н; $\bar{A}=0,4$, $J_L / J_T=0,214$; при $M_H=M_{ном}$, де: 1 – $\Omega=35^\circ$; 2 – $\Omega=45^\circ$; 3 – $\Omega=55^\circ$.

Як і при флюгерному регулюванні, збільшення кута встановлення відцентрових тягарців зменшує кут нахилу експериментальної і теоретичної [7, 9] статичної характеристики, що призводить, відповідно, до згладжування статичної характеристики ротора та підвищення точності регулювання.

На рис. 13 наведені статичні характеристики при різних величинах початкового натягнення пружини при антифлюгерному регулюванні при таких параметрах відцентрового регулятора: $\Theta=52^\circ$; $\Omega=45^\circ$; $J_T=1,4 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; $J_L / J_T=0,214$; при $M_H=M_{ном}$, де: 1 – $F_{\Pi p_0}=50$ Н; 2 – $F_{\Pi p_0}=40$ Н; 3 – $F_{\Pi p_0}=30$ Н.

Як зазначалося в аналізі флюгерного регулювання, $F_{\Pi p_0}$ входить в параметр $\bar{A}$, але, оскільки діапазон його зміни незначний, то і його вплив на форму статичної характеристики ротора незначний, а тому зміна величини початкового натягнення пружини дозволяє використовувати його, як і при флюгерному регулюванні, для налагодження регулятора на номінальні оберти, тобто зміна $F_{\Pi p_0}$ в межах від 30 до 50 Н дозволяє змінювати оберти в межах $(0,89 \div 1,055) n_{ном}$.

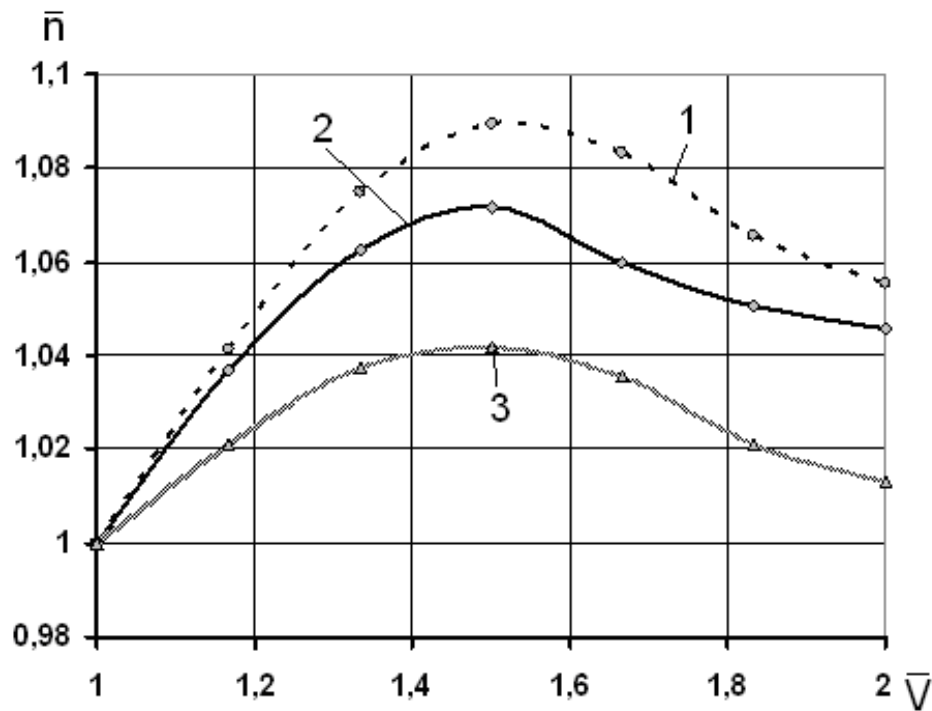


Рис. 12. Статичні характеристики ротора при анти флюгерному регулюванні при різних кутах встановлення відцентрових тягарців.

Fig. 12. Static characteristics of the rotor with anti-flood control at different angles of centrifugal gravity.

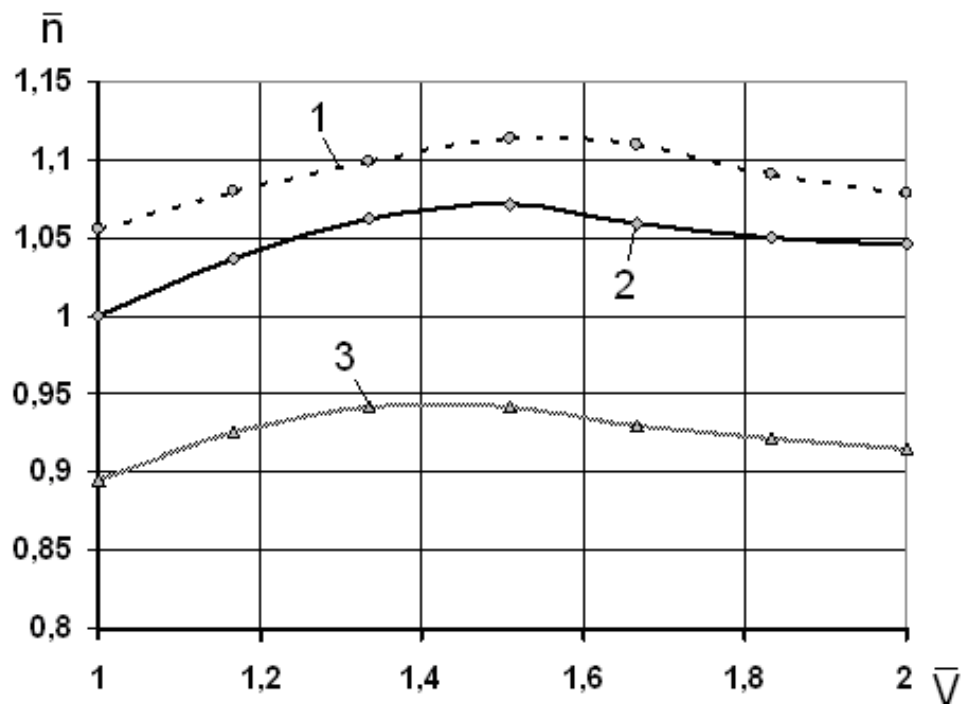


Рис. 13. Статичні характеристики ротора при флюгерному регулюванні при різних величинах початкового натягіння пружини регулювання.

Fig. 13. Static characteristics of the rotor with a snorkel regulation at different values of the initial pressure gravity of the regulation spring.

Відхилення обертів ротора вітроустановки з відцентровим регулятором при динамічних навантаженнях. На рис. 14 наведені динамічні відхилення обертів ротора під час збільшення швидкості повітряного потоку з 3,5 м/с до 5,5 м/с та зменшення швидкості повітряного потоку з 5,5 м/с до 3,5 м/с при таких параметрах відцентрового регулятора: $\Theta=52^\circ$; $\Omega=40^\circ$; $J_T=1,0 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; $F_{\text{Пр}0}=30$ Н; $\bar{A}=0,3$; $J_{\text{Л}}/J_T=0,3$ та при $M_H = M_{\text{ном}}$, де: 1 – при зменшенні швидкості повітряного потоку з 5,5 м/с до 3,5 м/с; 2 – при збільшенні швидкості повітряного потоку з 3,5 м/с до 5,5 м/с; 3 – середні значення при зменшенні швидкості повітряного потоку з 5,5 м/с до

3,5 м/с; 4 – середні значення при збільшенні швидкості повітряного потоку з 3,5 м/с до 5,5 м/с.

Для параметрів та характеристик ротора експериментальної установки та додаткових параметрів відцентрового регулятора, при яких проводились динамічні випробування розраховані коефіцієнти A та B у відповідності з діаграмою Вишнеградського [6, 8], складають: $A=4,43$; $B=4,04$, що відповідає аперіодичному перехідному процесу. Це підтверджується тим, що динамічні відхилення обертів ротора у разі збільшення швидкості вітру з 3,5 м/с до 5,5 м/с та зменшення швидкості вітру з 5,5 м/с до 3,5 м/с не виходять за межі відхилень при статичних навантаженнях (рис. 14).

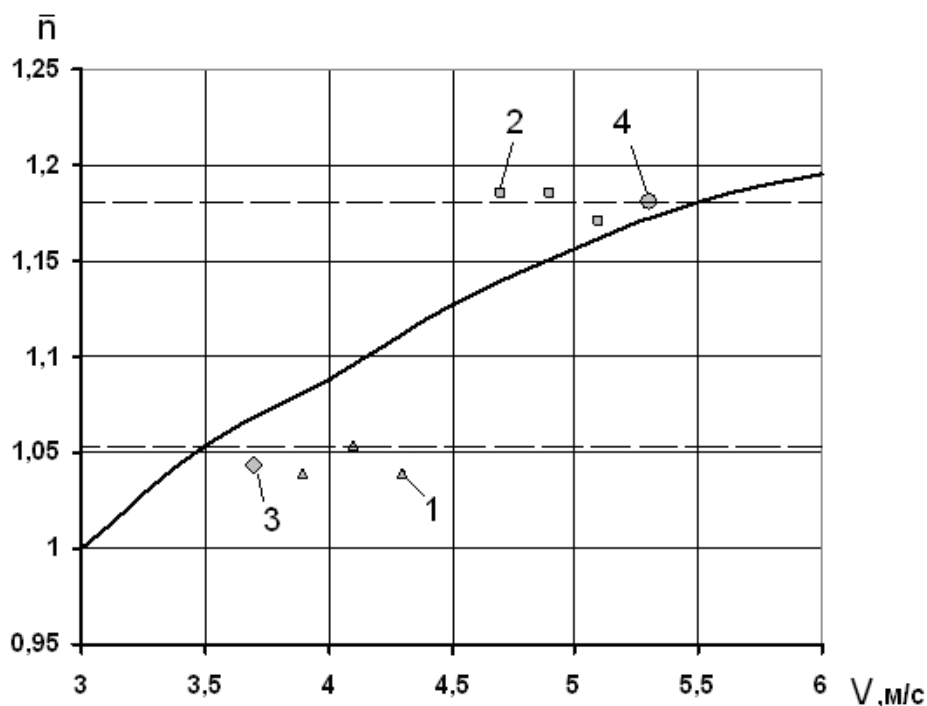


Рис. 14. Відхилення обертів ротора при збільшенні та зменшенні швидкості повітряного потоку.

Fig. 14. Deviation of rotor rotation with increase and decrease of air flow velocity.

На рис. 15 наведені динамічні відхилення обертів ротора при раптовому зменшенні навантаження з номінального до холостого ходу та раптовому збільшенні навантаження з холостого ходу до номінального при параметрах відцентрового регулятора: $\Theta=52^\circ$; $\Omega=40^\circ$; $J_T=1,0 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; $F_{\text{Пр}0}=30$ Н; $\bar{A}=0,3$; $J_{\text{Л}}/J_T=0,3$ та при швидкості

повітряного потоку $V=5,5$ м/с, де: 1 – при зменшенні навантаження з $M_{\text{ном}}$ до $M=0$; 2 – при збільшенні навантаження з $M=0$ до $M_{\text{ном}}$; 3 – середні значення при зменшенні навантаження з $M_{\text{ном}}$ до $M=0$; 4 – середні значення при збільшенні навантаження з $M=0$ до $M_{\text{ном}}$.

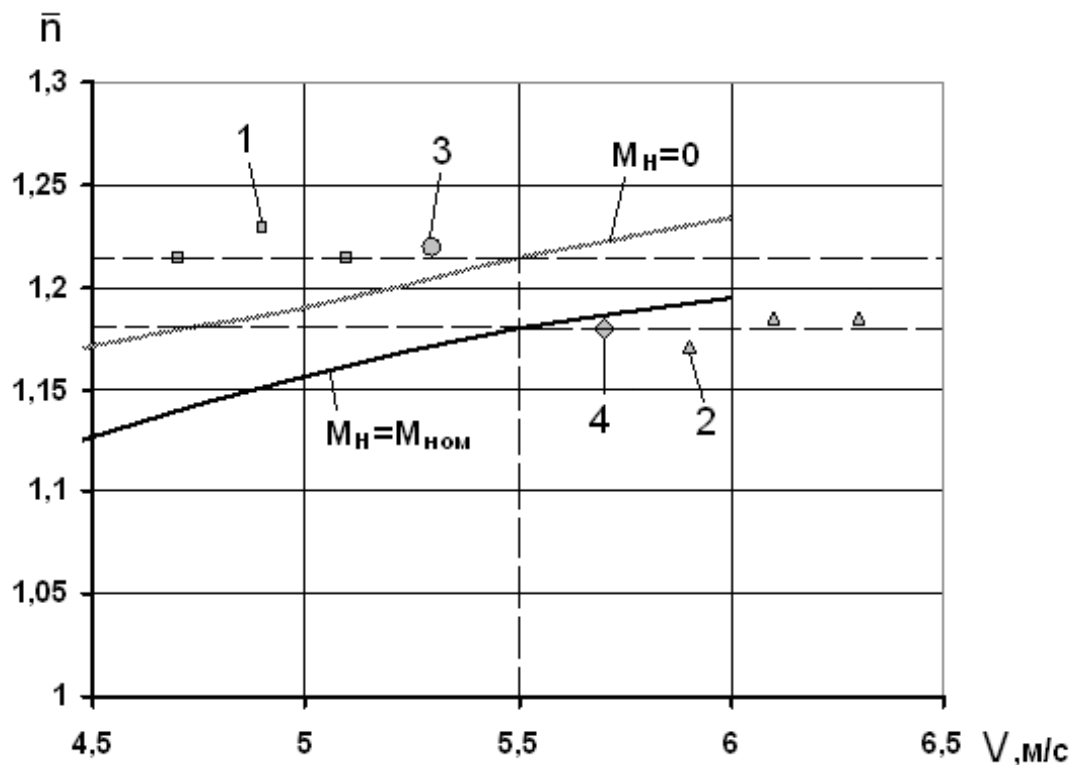


Рис. 15. Відхилення обертів ротора при збільшенні, зменшенні навантаження на ротор вітроустановки.

Fig. 15. Deviation of rotor rotation with increase, decrease of load on rotor of wind turbine.

Висновки. 1. Співставлення експериментальних статичних характеристик ротора, отриманих при флюгерному регулюванні під час збільшення та зменшення швидкості вітру, підтвердило теоретичне припущення, закладене в основу математичної моделі про незначний вплив тертя на роботу відцентрового регулятора. Різниця між статичними характеристиками склала 0,28%.

2. При співставленні теоретично розрахованої та експериментальної статичних характеристик при флюгерному регулюванні відносно відхилення для діапазону зміни швидкості вітру від V_H до $2V_H$ складає 1,27%. Аналогічне співставлення статичних характеристик при антифлюгерному регулюванні показало, що найбільше відхилення між характеристиками знаходиться в точці перегину характеристик на швидкості вітру $1,5V_H$ і, відповідно, складає 1,29%.

3. Отримані статичні характеристики ротора при флюгерному та антифлюгерному регулюванні при різних співвідношеннях моментів інерції лопаті та відцентрових тягарців (відповідно: 0,3; 0,214; 0,143) і при різних кутах встановлення

відцентрових тягарців (в діапазоні зміни кутів встановлення для флюгерного регулювання $40^\circ \div 80^\circ$ та $35^\circ \div 55^\circ$ для антифлюгерного регулювання) показали, що відносне збільшення моменту інерції відцентрових тягарців і збільшення кутів їхньої установки підвищує точність регулювання та співпадає з теоретично розрахованими статичними характеристиками відцентрового регулятора.

4. Відхилення обертів ротора при зовнішніх збуреннях і співставлення з відповідними статичними характеристиками показало, що відхилення обертів не виходять за межі статичних характеристик. При цьому, коефіцієнти діаграми Вишнеградського, що розраховані з параметрами та характеристиками експериментального ротора та відцентрового регулятора, показали, що в системі регулювання має спостерігатися аперіодичний перехідний процес.

1. Кудря С.О., Пепелов О.В. Тенденції та перспективи розвитку вітроенергетичної галузі в світі // Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлю-

вана енергетика XXI століття». – АР Крим, смт. Миколаївка, 14–18 вересня 2009 року. – С. 199–200.

2. Кудря С.О., Пепелов О.В., Ціцікан Р.М. Сучасний стан розвитку вітроенергетики в світі // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика XXI століття». – АР Крим, смт. Миколаївка, 13–17 вересня 2010 року. – С. 118–120.

3. Кудря С.А., Кузнецов Н.П., Сахно Б.Г. Опыт использования ветровых электрических установок в Украине // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – №8. – С. 50–53.

4. Кудря С.О., Головки В.М., Коханевич В.П. та ін. Розроблення ефективних методів і засобів перетворення, акумуляції та використання енергії вітру // Відновлювана енергетика. – 2007. – №3 (10). – С. 26–39.

5. Коханевич В.П. Статичні характеристики відцентрового регулятора при флюгерному регулюванні ротора вітрогенератора // Відновлювана енергетика. – 2008. – №1 (12). – С. 39–44.

6. Коханевич В.П. Динамічна стійкість системи регулювання ротора вітрогенератора з відцентровим регулятором // Відновлювана енергетика. – 2008. – №3 (14). – С. 47–54.

7. Коханевич В.П. Статика регулювання роторів вітрогенераторів відцентровими регуляторами при антифлюгерному регулюванні // Відновлювана енергетика. – 2009. – №3 (18). – С. 18–24.

8. Коханевич В.П. Умови стійкості системи регулювання ротора вітроустановки з відцентровим регулятором при антифлюгерному регулюванні // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – №2. – С. 28–36.

9. Коханевич В.П. Вопросы статистики регулирования ветроустановок центробежными регуляторами // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – №7 (111). – С. 56–63.

10. Коханевич В.П., Головки В.М., Шихайлов М.О. Розробка стенду та методики дослідження відцентрових регуляторів для вітроустановок // Відновлювана енергетика. – 2017. – №4 (51). – С. 43–51.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ВЕТРОУСТАНОВОК

В.М. Головки, профессор, доктор технических наук,
В.П. Коханевич, кандидат технических наук,
Н.А. Шихайлов.

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

Представлены результаты экспериментальных исследований центробежного регулятора роторов ветроустановок при его различных параметрах при статических и динамических нагрузках, и проведено их сопоставление с теоретическими положениями. Библ. 10, рис. 15.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветроустановка, ротор ветроустановки, центробежный регулятор.

REFERENCES

1. Kudrya S.O., Pepelov O.V. Trends and Prospects for the Development of the Wind Energy Industry in the World // Materials of the X International Scientific and Practical Conference «Renewable Energy of the XXI Century». AR Crimea, smt. Mykolayivka, September 14–18, 2009. – P. 199–200 (in Ukr)

2. Kudrya S.O., Pepelov O.V., Tsitsikan R.M. The current state of development of wind power in the world // Proceedings of the XI International Scientific Conference «Renewable energy XXI century». AR Crimea, smt. Mykolayivka, 13–17 September 2010. – P. 118–120 (in Ukr)

3. Kudrya S.O., Kuznetsov M.P., Sakhno B.G. Experience of using wind power plants in Ukraine // Alternative energy and ecology. – 2011. – №8. – P. 50–53 (in Rus)

4. Kudrya S.O., Golovko V.M., Kokhanievych V.P. and others. Development of effective methods and means of conversion, accumulation and use of wind energy // Renewable energy. – 2007. – №3 (10). – P. 26–39 (in Ukr)

5. Kokhanievych V.P. Static characteristics of the centrifugal regulator with wind turbine regulation of the wind turbine rotor // Renewable energy. – 2008. – №1 (12). – P. 39–44 (in Rus)

6. Kokhanievych V.P. Dynamic stability of the control system of a rotor of a wind turbine with a centrifugal regulator // Renewable energy. – 2008. – №3 (14). – P. 47–54 (in Ukr)

7. Kokhanievych V.P. Statics of regulation of rotors of wind turbines by centrifugal regulators at anti-fluelling regulation // Renewable energy. – 2009. – №3 (18). – P. 18–24 (in Ukr)

8. Kokhanievych V.P. Conditions of stability of the control system of the rotor of the wind turbine with a centrifugal regulator with anti-fluelling regulation // Power engineering: economics, technology, ecology. – 2011. – №2. – P. 28–36 (in Ukr)

9. Kokhanievych V.P. Questions of the statics of wind power regulation by centrifugal regulators // Alternative energy and ecology. – 2012. – №7 (111). – P. 56–63 (in Rus)

10. Kokhanievych V.P., Golovko V.M., Development of the stand and methods of research of centrifugal regulators for wind turbines // Renewable energy. – 2017. – №4 (51). – P. 43–51 (in Ukr)

SYNOPSIS

The widespread introduction of low-power wind power plants raises a number of requirements for their construction. Given that these installations work in close proximity to residential spaces, safety and reliability are at the forefront, and they are directly dependent on cash flow and power control systems. Control systems using centrifugal regulators provide sufficient reliability and are relatively simple in design. Further improvement of this type of regulators requires both theoretical studies and their experimental confirmation.

To study various types of regulators for wind power plants at the Institute of Renewable Energy, a bench and an experimental rotor with a centrifugal regulator was designed and manufactured and a research method was proposed.

In the course of the research, experimental static rotors of the wind turbine with a centrifugal regulator were obtained during floodgeneration and anti-flood control with the change: the torque at the rotor; the values of the initial tension of the regulation spring; moment of inertia of centrifugal loads; the angle of installation of centrifugal weights and deflection of rotor turns in external perturbations, namely, with a sudden increase and decrease in the load on the rotor and at a sudden change in wind speed.

The analysis of the experimental static rotor confirmed the theoretical assumption, which is based on the mathematical model, on the insignificant effect of friction on the operation of the centrifugal regulator. When comparing theoretically calculated and experimental static characteristics with weather control, the relative deviation is 1.27%, while the anti-flood control is 1.29%, respectively.

The deviations of the rotation of the rotor in external perturbations and the comparison with the corresponding static characteristics showed that the deflections of the rotations do not go beyond the boundaries of static characteristics, while the coefficients of the Vyshnegradsky diagram, which are calculated with the parameters and characteristics of the experimental rotor and centrifugal regulator, have shown that the control system should be observed aperiodic transitional process.

РЕФЕРАТ

Широке впровадження вітроустановок малої потужності ставить ряд вимог до їхніх конструкцій. Враховуючи те, що ці установки працюють у безпосередній близькості до житлових приміщень, на перший план виходять безпека та надійність, які прямо залежать від наявних систем регулювання обертів та потужності. Системи регулювання з використанням відцентрових регуляторів забезпечують достатню надійність та є відносно нескладними за своєю конструкці-

єю. Подальше удосконалення регуляторів такого типу потребує як теоретичних досліджень, так і їхніх експериментальних підтверджень.

Для досліджень різних типів регуляторів роторів вітроустановок в Інституті відновлюваної енергетики НАН України був розроблений і виготовлений стенд та експериментальний ротор з відцентровим регулятором і запропонована методика проведення досліджень.

В ході проведення досліджень, були отримані експериментальні статичні характеристики ротора вітроустановки з відцентровим регулятором при флюгерному та антифлюгерному регулюванні при зміні: моменту навантаження на роторі; величини початкового натягнення пружини регулювання; моменту інерції відцентрових тягарців; кута встановлення відцентрових тягарців та визначені відхилення обертів ротора при зовнішніх збуреннях, а саме, під час раптового збільшення та зменшення навантаження на ротор та під час раптової зміни швидкості вітру.

Аналіз експериментальних статичних характеристик ротора підтвердив теоретичне припущення, що закладене в основу математичної моделі про незначний вплив тертя на роботу відцентрового регулятора. При співставленні теоретично розрахованої та експериментальної статичних характеристик при флюгерному регулюванні відносно відхилення складає 1,27%, при антифлюгерному регулюванні відповідно складає 1,29%.

Відхилення обертів ротора при зовнішніх збуреннях і співставлення з відповідними статичними характеристиками показало, що відхилення обертів не виходять за межі статичних характеристик. При цьому коефіцієнти діаграми Вишнеградського, що розраховані з параметрами та характеристиками експериментального ротора та відцентрового регулятора, показали, що в системі регулювання має спостерігатися аперіодичний перехідний процес.

Стаття надійшла до редакції 30.05.18

Остаточна версія 16.08.18