УДК 621.548

РОЗРОБКА СТЕНДУ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДЦЕНТРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ ВІТРОУСТАНОВОК

В.М.Головко, проф., докт. техн. наук,
Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 02094, м. Київ, вул. Гната Хоткевича, 20А,
тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0195-9654
В.П.Коханєвич, канд. техн. наук,
Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 02094, м. Київ, вул. Гната Хоткевича, 20А,
тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0033-1355
М.О.Шихайлов, Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
02094, м. Київ, вул. Гната Хоткевича, 20А,
тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1845-9904

Розроблено та виготовлено стенд для проведення досліджень відцентрових регуляторів для вітроустановок, що включає аеромеханічну частину, ротор з відцентровим регулятором та блок вимірювань і навантажень, який дозволяє дослідити роботу регулятора при різних його параметрах при статичних та динамічних навантаженнях та запропонована методика проведення даних досліджень. Бібл. 15, рис. 7.
***Ключові слова**: вітроенергетика, вітроустановка, ротор вітроустановки, відцентровий регулятор.*

DEVELOPMENT OF THE STAND AND METHODS OF RESEARCH OF CENTRIFUGAL REGULATORS FOR WINDOWS

Golovko V.,
Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Hnata Khotkevycha, 20A, 02094, Kyiv-94, Ukraine,
Phone/fax: +38-044-206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0195-9654
Kokhanievych V.,
Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Hnata Khotkevycha, 20A, 02094, Kyiv-94, Ukraine,
Phone/fax: +38-044-206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0033-1355
Shykhailov A.,
Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Hnata Khotkevycha, 20A, 02094, Kyiv-94, Ukraine,
Phone/fax: +38-044-206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1845-9904

A bench for conducting research of centrifugal regulators for wind turbines is developed and made. This bench includes an aeromechanical part, a rotor with a centrifugal regulator, and a block of measurements and loads, which allows us to investigate the operation of the regulator at its various parameters in static and dynamic loads, and the proposed method of conducting research data. References 15, figures 7.
***Keywords:** wind power, wind turbine, wind turbine rotor, centrifugal regulator.*



Головко В.М.,
Golovko V.

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

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

Область наукових інтересів: відновлювані джерела енергії, вітроенергетика, вітроустановки малої потужності, автономні системи енергозабезпечення.

Публікації: 145.

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

Education: graduated from the Ukrainian Agricultural Academy in 1977 with the degree of "Electrification of Agriculture".

Area of researches: renewable sources of energy, wind power systems, small capacity wind units, autonomous power systems.

Publications: 145.

© В.М.Головко, В.П.Коханевич, М.О.Шихайлов, 2017



Коханєвич В.П.,
Kokhanievych V.

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

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

Область наукових інтересів: вітроенергетика, вітроустановки малої потужності, системи регулювання та захисту.

Публікації: 118

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

Education: graduated from the Kyiv Polytechnic Institute in 1979 with the specialization "Technology of Machine-Building, Metal Cutting Machines and Tools".

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

Publications: 118.



Шихайлов М.О.,
Shykhailov A.

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

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

Область наукових інтересів: вітроенергетика, вітроустановки малої потужності, системи управління.

Публікації: 189

Information about the author: Researcher in wind department at Institute for Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.

Education: graduated from the Kyiv Polytechnic Institute in 1979 with the specialty "Hydropneumatic and Hydraulic Drive";

Area of researches: wind power systems, small capacity wind units, control systems.

Publications: 189.

Перелік використаних позначень

V – швидкість повітряного потоку, що набігає на ротор;
J_T – момент інерції відцентрових тягарців;
$J_Д$ – момент інерції державки;
m_T – маса відцентрових тягарців;
r_T – відстань від вісі обертання лопаті до центру ваги тягарців;
$F_{Пр_0}$ – величина початкового натяжіння пружини регулювання;
$l_{Пр}$ – довжина пружини регулювання;
$M_Н$ – момент навантаження;
$M_{ном}$ – номінальний момент навантаження;
n – швидкість обертання ротора;
Θ – кут між кривошипом і хордою лопаті;
f – показання частотоміра;
$K_г$ – число пар полюсів генератора;
R – опір навантаження;
P – потужність на затискачах генератора.

Вступ. Удосконалення сучасних вітроустановок (ВУ) малої потужності потребує, відповідно, удосконалення систем регулювання обертів та потужності [1–3]. Одним із таких простих та надійних регуляторів, що набули широкого розповсюдження в системах регулювання вітроустановок малої потужності, є відцентрові регулятори.

Запропоновані в роботах [4–10] нові теоретичні положення, що слугують для удосконалення методик розрахунку відцентрових регуляторів роторів ВУ, потребують експериментальної перевірки.

Постановка завдання. Дослідження відцентрових регуляторів роторів вітроустановок вимагає врахування наступних специфічних вимог:

– необхідність проведення великої кількості замірів;

– немає необхідності точного визначення швидкості повітряного потоку, натомість потрібно визначати відносну швидкість його зміни;

– необхідність проведення динамічних випробувань при різкій зміні швидкості повітряного потоку.

В ДСТУ 7338:2013 визначено наступні способи проведення досліджень ВУ малої потужності [11]:

– в натурних умовах;

– в аеродинамічній трубі;

– на рухомій платформі (автомобілі).

Проаналізуємо доцільність використання вищенаведених способів дослідження для використання їх на відповідність вимогам дослідження відцентрових регуляторів роторів вітроустановок [12–15].

Проведення експериментальних досліджень у натурних умовах потребує обладнаного полігону та значного проміжку часу для проведення досліджень у потрібному обсязі за умови наявності достатнього діапазону швидкостей вітру. Проведення досліджень в аеродинамічній трубі потребує значних фінансових витрат, а в технічному плані досить важко імітувати динамічні випробування при різкій зміні швидкості повітряного потоку. Аналогічні задачі, хоч і в меншій мірі, виникають під час випробовувань при транспортуванні ВУ на рухомій платформі (автомобілі).

З урахуванням вищенаведених причин, в Інституті відновлюваної енергетики був розроблений та виготовлений стенд для проведення експериментальних досліджень відцентрових та інших типів регуляторів роторів вітроустановок.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення поставленої задачі необхідно було провести наступні роботи:

– розроблення загальної схеми стенду;

– вибір обладнання, яке серійно виробляється, та розробка і виготовлення оригінальних вузлів (ротор, відцентровий регулятор, синхронний генератор тощо);

– тестування і тарування обладнання;

– розробка методики випробування.

Для дослідження систем регулювання роторів з відцентровим регулятором була запропонована наступна схема стенду, що наведена на рис. 1.

Призначення та опис основних складових стенду. Пересувний вентилятор призначений для створення рівномірного повітряного потоку зі швидкістю до 7 м/с. Схема пересувного вентилятора потужністю 4 кВт та загальний вигляд наведені на рис. 2.

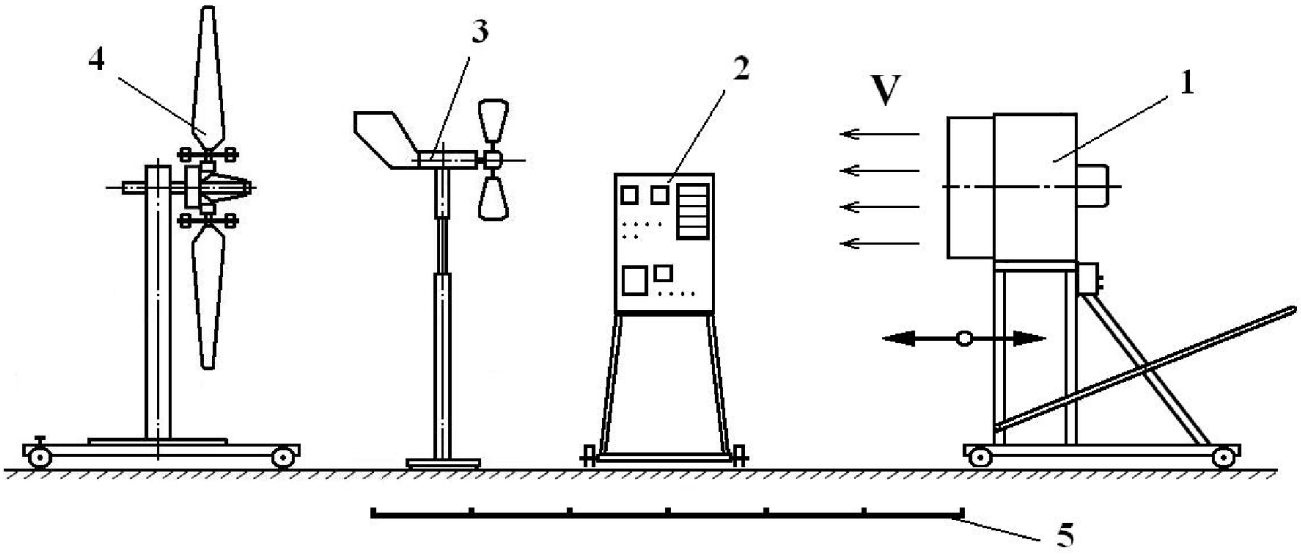


Рис. 1. Загальна схема дослідного стенду: *1 – пересувний вентилятор; 2 – блок вимірювань та навантажень; 3 – анемометр; 4 – ротор на опорі; 5 – лінія розмітки.*

Fig. 1. General scheme of the test stand: *1 - mobile fan; 2 - block of measurements and loads; 3 - anemometer; 4 - the rotor on the support; 5 - markup line.*

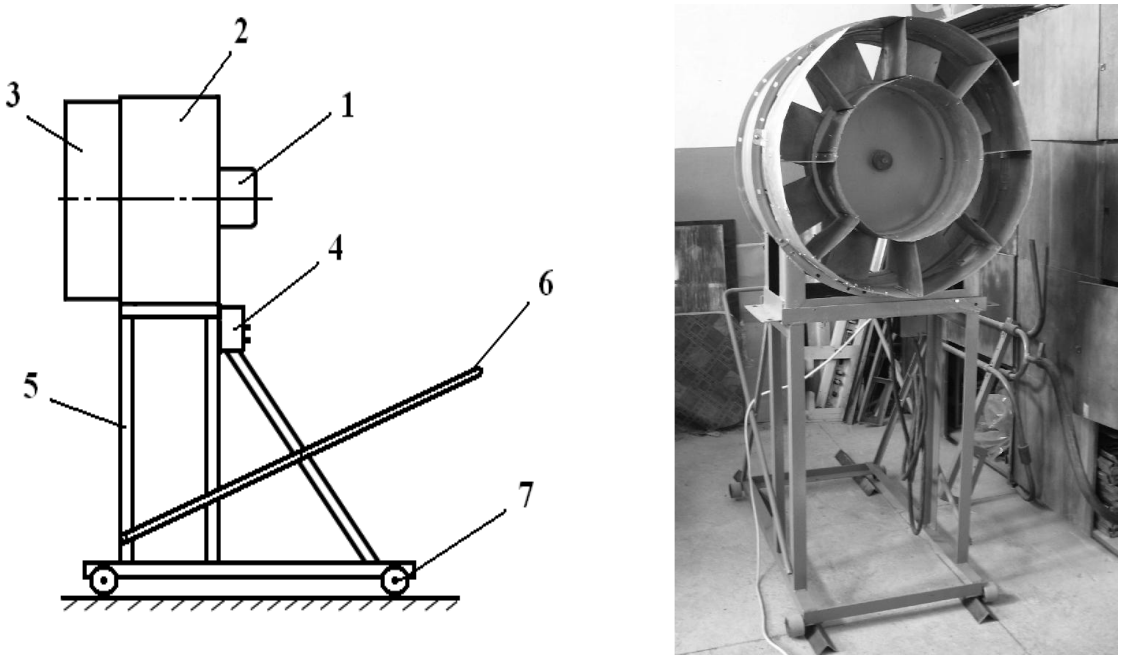


Рис. 2. Схема та загальний вигляд пересувного вентилятора: *1 – асинхронний двигун з крильчаткою; 2 – кожух; 3 – дифузор; 4 – блок керування; 5 – рама опорна; 6 – ручка; 7 – ролики.*

Fig. 2. Scheme and general view of the mobile fan: *1 - asynchronous motor with a impeller; 2 - casing; 3 - diffuser; 4 - control unit; 5 - frame bearing; 6 - pen; 7 - rollers.*

Повітряний потік, створений крильчаткою, яка насаджена на вал електродвигуна 1 і розміщена в кожусі 2, проходить через дифузор 3. Дифузор дозволяє випрямити та сфокусувати повітряний потік. Вище перелічені елементи встановлені на опорній рамі 5 з роликами 7, що дозволяє за допомогою ручки 6 переміщувати вентилятор у напрямку ротора для отримання необхідної швидкості повітряного потоку в площині ротора. Блок керування 4 служить для запуску та зупинки вентилятора.

Блок вимірювань та навантажень являє собою функціонально об’єднаний набір вимірювальних приладів, таких як вольтметр, амперметр і набір активних навантажень різної потужності, що конструктивно об’єднані в приладовій шафі, а також прилад UT70B, який включає в себе частотомір. Загальний вигляд блоку вимірювань та навантажень наведено на рис. 3.

Для вимірювань повітряного потоку використовувався анеморумбограф М-47.

Ротор на опорі включає в себе такі основні вузли: ротор, синхронний генератор та опорну конструкцію. Схема та загальний вигляд ротора на опорі наведені на рис. 4.

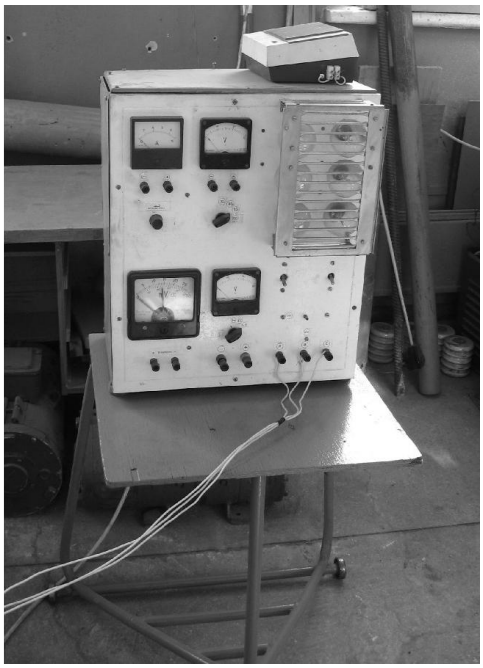


Рис. 3. Загальний вигляд блоку вимірювань та навантажень.

Fig. 3. General view of the block of measurements and loads.

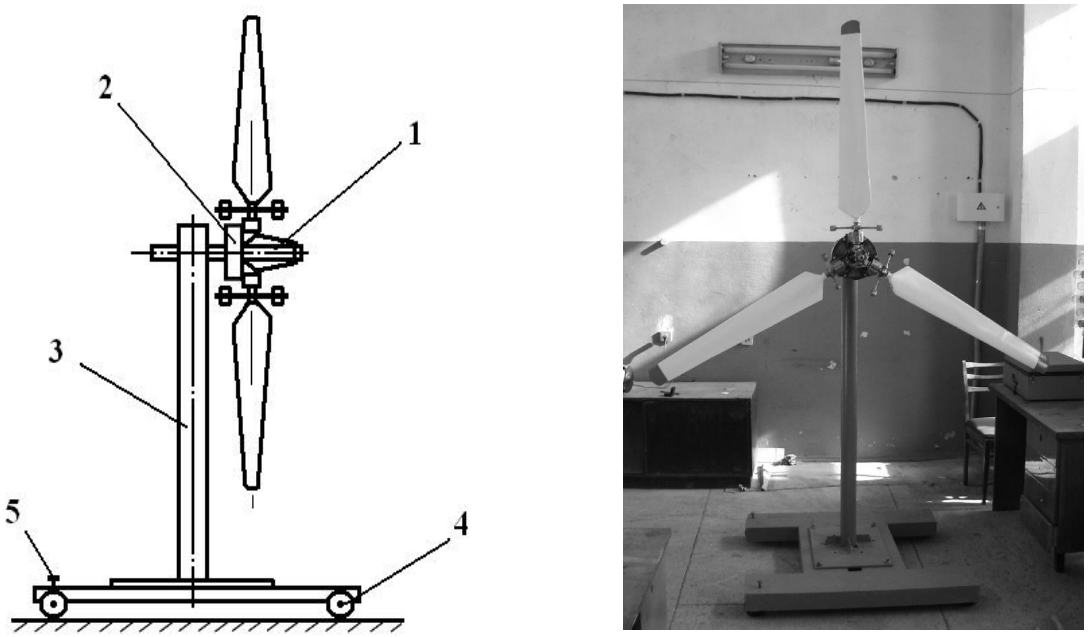


Рис. 4. Схема та загальний вигляд ротора на опорі:
1 – ротор; 2 – генератор; 3 – опорна конструкція; 4 – ролики; 5 – фіксатор.

Fig. 4. Scheme and general view of the rotor on the support:
1 - rotor; 2 - generator; 3 - supporting structure; 4 - rollers; 5 - latch.

Для дослідження системи регулювання ротора з відцентровим регулятором був спроектований та виготовлений ротор ВЕУ-1.01.20.00.000 СК, до складу якого входять маточина, відцентровий регулятор та комплект лопатей.

Основні технічні характеристики ротора:

– діаметр, м 2
– кількість лопатей, шт. 3
– профіль лопатей FX – 170K

Маточина ротора кріпиться на корпусі синхронного генератора і являє собою несучу конструкцію, в якій розміщено відцентровий регулятор та підшипникові вузли поворотних лопатей.

Відцентровий регулятор, спроектований подібно до регуляторів вітроустановок АВЕС-2-4, АВЕС-4-7, ВЕУ-1.01.00.00.000.СК та ряду інших ВУ, дозволяє в широкому діапазоні змінювати параметри регулювання, такі як момент інерції відцентрових тягарців, величину початкового натяжіння пружини регулювання, величини кута встановлення кривошипа відносно лопаті та кута встановлення відцентрових тягарців. Вибір довжини пружини і діаметра дроту дозволяє в широкому діапазоні варіювати жорсткістю пружини. При необхідності конструкція регулятора дозволяє переходити з флюгерного на антифлюгерне регулювання.

На рис. 5 наведена загальна схема відцентрового регулятора ротора вітроустановки, а на рис. 6 – загальний вигляд маточини з відцентровим регулятором.

На махах лопатей 1 за допомогою державок 3 закріплені тягарці 2. Кріплення відцентрових тягарців дозволяє встановлювати їх під різними кутами відносно лопаті, а їх переміщення вздовж державок – змінювати момент інерції. Закріплені на махах лопатей кривошипи 4 через тягу 5 зв'язують обертання лопаті з переміщенням втулки 6 і, відповідно, з натяжінням пружини регулювання. Упор 9 дозволяє змінювати величину попереднього натяжіння пружини регулювання.

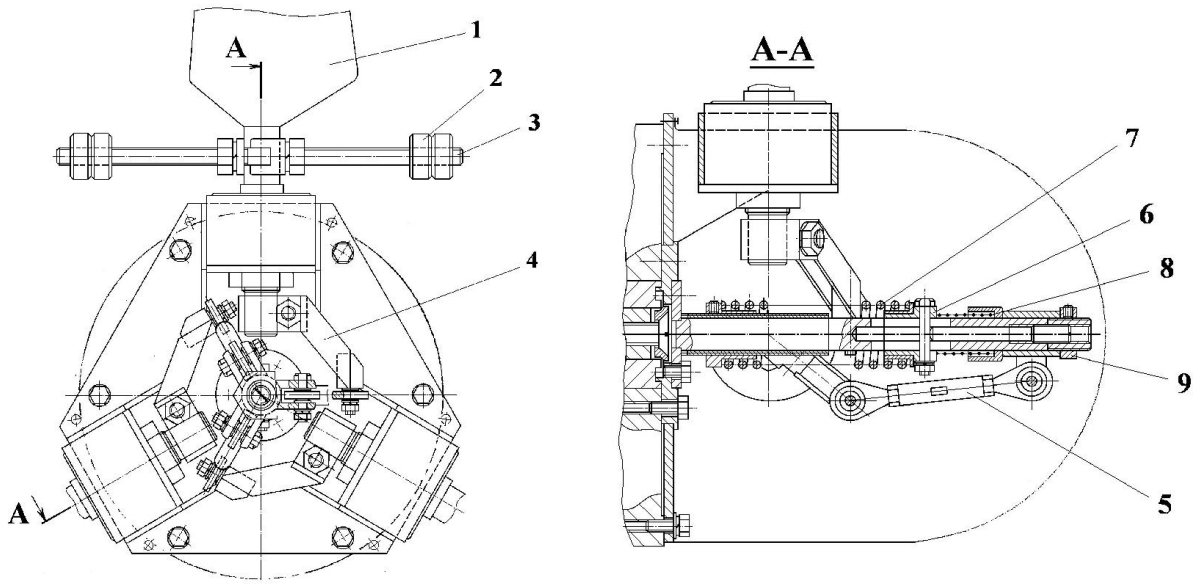


Рис. 5. Загальна схема відцентрового регулятора ротора ВУ: *1 – лопать; 2 – відцентрові тягарці; 3 – державки відцентрових тягарців; 4 – кривошип; 5 – тяга; 6 – втулка; 7 – пружина регулювання; 8 – пружина пускова; 9 – упор.*

Fig. 5. General scheme of the centrifugal regulator rotor WP: *1 - blade; 2 - centrifugal workers; 3 - centrifugal burden holders; 4 - crank; 5 - thrust; 6 - sleeve; 7 - adjustment spring; 8 - start spring; 9 – emphasis.*



Рис. 6. Загальний вигляд маточини з відцентровими тягарцями.

Fig. 6. General view of the hub with centrifugal gravity.

Генератор являє собою торцевий синхронний генератор з постійними магнітами. Генератор є опорною конструкцією, до якої кріпиться ротор. В сукупності з блоком ступінчастих навантажень генератор дозволяє забезпечити необхідні режими навантаження при дослідженні ротора та системи регулювання.

Опорна конструкція забезпечує кріплення генератора та, при необхідності, її переміщення разом із ротором.

Лінія розмітки наноситься наступним способом. На місці опори з ротором встановлюється анеморумбограф М-47 та вмикається переставний вентилятор. Спочатку вентилятор встановлюється на відстані, що відповідає швидкості повітряного потоку 3 м/с, і наноситься перша відмітка. Переставляючи вентилятор у напрямку анемометра, наносяться наступні відмітки, що відповідають певним швидкостям повітряного потоку з інтервалом 0,5 м/с.

Методика проведення досліджень включає:

– визначення статичних характеристик ротора вітроустановки для флюгерного та антифлюгерного регулювання;

– визначення впливу сил тертя на роботу відцентрового регулятора;

– визначення відхилень обертів ротора при динамічних навантаженнях.

Статична характеристика ротора вітроустановки являє собою залежність обертів ротора від швидкості вітру $n = f(V)$ [5, 8]. Визначення даної характеристики проводиться на стенді при різних параметрах відцентрового регулятора, а саме:

– куті встановлення кривошипа;

– куті встановлення відцентрових тягарців відносно площини обертання ротора;

– моменті інерції відцентрових тягарців;

– різних моментах навантаження на роторі.

Величина впливу сил тертя на роботу регулятора визначається за різницею між двома статичними характеристиками, визначеними при збільшенні та зменшенні швидкості вітру.

Відхилення обертів ротора при динамічних навантаженнях визначається співставленням відхилень обертів за статичною характеристикою та отриманих обертів при динамічних навантаженнях за відповідних параметрів відцентрового регулятора.

Визначення постійних параметрів відцентрового регулятора та параметрів регулювання.

Визначення постійних параметрів регулятора, таких як радіус кривошипа, довжина важеля, довжина пружини у нестисненому стані, проводиться вимірюванням.

Кут встановлення кривошипа визначається шаблоном або розраховується за відповідними параметрами відцентрового регулятора.

Кути встановлення відцентрових тягарців відносно площини обертання ротора вимірюються шаблоном або кутоміром.

Початковий кут установлення лопаті (для флюгерного регулювання $+7^0$, для антифлюгерного регулювання $+2^0$) виставляється за допомогою відповідних шаблонів.

Визначення швидкості вітру проводиться за відповідними мітками лінії розмітки.

Швидкість обертання ротора визначається за частотою обертання ротора і вимірюється приладом UT70B та вираховується за формулою:

$$n = \frac{30f}{\pi K_Г},$$

де f – показання приладу; $K_Г$ – число пар полюсів генератора.

Навантаження на генератор та, відповідно, на ротор визначається за замірами напруги при під'єднанні різних величин опору та вираховується за формулою:

$$P = \frac{U^2}{R},$$

де U – напруга на затискачах випрямляча; R – величина опору.

Величина початкового натяжіння пружини регулятора $F_{Пр_0}$ визначається її довжиною при зупиненому роторі у відповідності з тарувальним графіком $F_{Пр_0} = f(l_{Пр})$, який наведено на рис 7.

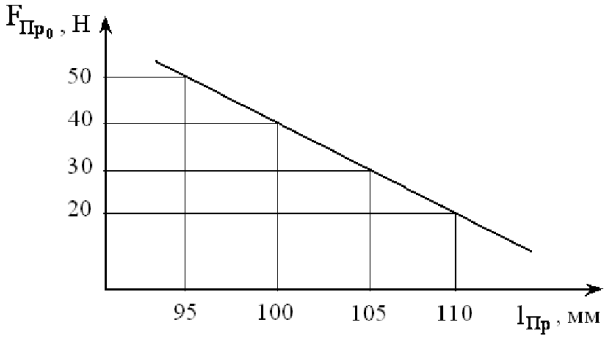


Рис. 7. Тарувальний графік пружини.

Fig. 7. Scheduling spring chart.

Момент інерції відцентрових тягарців розраховується за формулою:

$$J_T = J_Д + m_m r_m^2,$$

де $J_д$ – момент інерції державки; m_m – маса відцентрових тягарців; r_m – відстань від осі обертання лопаті до центру маси тягарців.

Об'єм проведення досліджень.

Визначення статичної характеристики проводиться в діапазоні швидкостей вітру від 3 м/с до 6 м/с через кожні 0,5 м/с при встановлених параметрах відцентрового регулятора:

– моменті навантаження на роторі при різних величинах навантажень на генераторі (R = 0; 300; 600 Ом, що при V = 3 м/с для даного ротора відповідає $M_H = 0$; $M_H = 0{,}5\,M_{ном}$; $M_H = M_{ном}$);

– величині початкового натяжіння пружини регулювання (для флюгерного регулювання: $F_{Пр_0}$ = 20; 30; 40 Н, для антифлюгерного: $F_{Пр_0}$ = 30; 40; 50 Н);

– моменті інерції відцентрових тягарців ($J_T = 1{,}0\cdot10^{-3}$; $1{,}4\cdot10^{-3}$; $2{,}1\cdot10^{-3}$ кг·м^2);

– куті встановлення відцентрових тягарців (для флюгерного регулювання: $\Omega = 80^0$; 60^0; 40^0, для антифлюгерного: $\Omega = 55^0$; 45^0; 35^0).

Повторність дослідів трикратна при зміні кожного з параметрів, що визначені програмою досліджень.

Заміри статичних характеристик для визначення впливу сил тертя проводяться трикратно при збільшенні швидкості вітру та трикратно при зменшенні швидкості вітру при наступних параметрах відцентрового регулятора: Θ = 52º; Ω = 40º; J_T = 1,4·10^{-3} кг·м^2; $F_{Пр_0}$ = 40 Н; M_H = 0.

Моменти навантаження на роторі та номінальні оберти ротора визначаються за аеромеханічними характеристиками ротора та, відповідно, за номінальними обертами ротора розраховуються величини початкового натяжіння пружини регулювання [5, 8].

Висновки. 1. Розроблено та виготовлено стенд для проведення досліджень відцентрових регуляторів для вітроустановок. Стенд включає аеромеханічну частину, експериментальний ротор з відцентровим регулятором та блок вимірювань і навантажень, який дозволяє дослідити роботу регулятора при різних його параметрах при статичних та динамічних навантаженнях.

2. Запропонована методика проведення досліджень включає дослідження впливу сил тертя в механізмі регулятора, визначення статичних характеристик ротора вітроустановки з відцентровим регулятором при флюгерному та антифлюгерному регулюванні при зміні: моменту навантаження на роторі; величини початкового натяжіння пружини регулювання; моменту інерції відцентрових тягарців; кута встановлення відцентрових тягарців та визначення відхилень обертів ротора при зовнішніх збуреннях, а саме при раптовому збільшенні та раптовому зменшенні навантаження на ротор та при раптовій зміні швидкості вітру.

1. *Кудря С. О., Пепелов О. В.* Тенденції та перспективи розвитку вітроенергетичної галузі в світі // Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції "Відновлювана 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 електрических установок в Украине // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 8. – С. 50–53.

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

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

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

7. *Коханєвич В. П.* Перехідні процеси в системах регулювання роторів з відцентровим регулятором // Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції "Відновлювана енергетика XXI століття". – АР Крим, смт. Миколаївка, 14 – 18 вересня 2009 року. – С. С. 248–250.

8. *Коханєвич В. П.* Статика регулювання роторів вітродвигунів відцентровими регуляторами при антифлюгерному регулюванні // Відновлювана енергетика. – 2009. – № 3(18). – С. 18–24.

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

10. *Коханєвич В. П.* Вопросы статики регулирования ветроустановок центробежными регуляторами // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 7(111). – С. 56–63.

11. Вітроенергетика. Установки електричні вітряні малої потужності. Методи випробування: ДСТУ 7338:2013. – К. : Мінекономрозвитку України, 2014. – 14 с.

12. *Повх И. Л.* Аэродинамический эксперимент в машиностроении. – М. – Л. : Машгиз, 1950. – 395 с.

13. *Пэнкхерст П., Холдер Д.* Техника эксперимента в аэродинамических трубах. – М. : Изд-во Иностранной литературы, 1955. – 667 с.

14. *Мартынов А. К.* Экспериментальная аэродинамика. – М. : Оборонгиз, 1958. – 478 с.

15. *Руденко Е.М., Госбах Г., Коханевич В.П. и др.* Экспериментальные исследования ротора Савониуса с изменяемой геометрией // Відновлювана енергетика. – 2005. – №2. – С. 35–39.

РАЗРАБОТКА СТЕНДА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ВЕТРОУСТАНОВОК

В.М.Головко, проф., докт. техн. наук,
Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, 02094, м. Киев, ул. Гната Хоткевича, 20А,
тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0195-9654

В.П.Коханевич, канд. техн. наук,
Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, 02094, м. Киев, ул. Гната Хоткевича, 20А,
тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0033-1355

Н.А.Шихайлов,
Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, 02094,

м. Киев, ул. Гната Хоткевича, 20А,
тел./факс +38-044-206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1845-9904

Разработан и изготовлен стенд для проведения исследований центробежных регуляторов для ветроустановок, включающий аэромеханическую часть, ротор с центробежным регулятором и блок измерений и нагрузок, который позволяет исследовать работу регулятора при разных его параметрах при статических та динамических нагрузках и предложена методика проведения данных исследований. Библ. 15, рис. 7.

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 h 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 h 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 VP* Transient processes in rotor control systems with a centrifugal regulator // Materials of the X International Scientific and Practical Conference «Renewable Energy of the XXI Century». AR Crimea, smt. Nikolaevka, September 14 – 18, 2009. – P. 248 – 250 [in Ukr.].

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

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

10. *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 Ukr.].

11. Wind power. Electric wind power plants of low power. Test methods: DSTU 7338: 2013. – K. : Ministry of Economic Development of Ukraine, 2014. – 14 p. [in Ukr.].

12. *Poch I. L.* Aerodynamic Experiment in Mechanical Engineering. – M. – L. : Mashgiz, 1950. – 395 p. [in Rus.].

13. *Pankhurst P., Holder D.* Technique of experiment in aerodynamic tubes. – M. : Publishing of Foreign Literature, 1955. – 667 p.

14. *Martynov A.K.* Experimental aerodynamics. – M. : Oborongiz, 1958. – 478 p. [in Rus.].

15. *Rudenko E.M., Gosbach G., Kokhanievych V.P. and others*. Experimental investigations of the rotor of Savonius with variable geometry // Renewable energy. – 2005. – № 2. – P. 35 – 39 [in Rus.].

SYNOPSES

Improvement of modern wind turbines (VU) of low power needs, accordingly, improvement of systems of regulation of speed and capacity. One of such simple and reliable regulators, which have become widespread in the systems of regulation of wind turbines, are centrifugal regulators. The new theoretical positions proposed in a series of works, which serve to improve the methods of calculating the centrifugal regulators of rotors of wind turbines, require an experimental verification.

Analyzing the main methods of research of wind turbines with centrifugal regulators, it is necessary to note the following. Conducting experimental studies in the field requires a well-equipped polygon and a significant amount of time to conduct research to the extent necessary, provided there are sufficient wind speeds. Conducting research in an aerodynamic tube requires significant financial costs, and it is difficult to simulate dynamic tests with a sharp change in air flow technically. Similar problems, albeit to a lesser extent, arise in the testing of the transport of wind turbines by car.

Taking into account the above-mentioned reasons, it was decided at the Renewable Energy Institute to develop and manufacture its own stand for experimental research on centrifugal and other types of regulators of wind turbine rotors. This stand includes an aeromechanical part, an experimental rotor with a centrifugal regulator and a block of measurements and loads, which allows to investigate the operation of the regulator at its various parameters with static and dynamic loads.

The proposed method of conducting research at the stand includes the study of the influence of frictional forces in the mechanism of the regulator, the determination of static characteristics of the rotor of the wind turbine with a centrifugal regulator during floodgate and anti-flueler regulation with the change: the moment of the load on the rotor; The values of the initial tension of the regulation spring; The moment of inertia of centrifugal weights; The angle of installation of centrifugal weights and the determination of rotor rotational deviations at external disturbances, namely, with a sudden increase and a sudden decrease in rotor load and sudden change in wind speed.

Стаття надійшла до редакції 03.11.17
Остаточна версія 04.12.17