

## Методика за изследване на ветроколела с вертикална ос на въртене

Ахмед Ахмедов

**Methodology for Studying of Wind Turbines with Vertical Axis of Rotation:** The experimental methods for studying of wind turbines are divided into two main groups namely full scale studies of wind turbines in field conditions and laboratory studies in which model of a wind turbine is examined in a wind tunnel. This work presents a methodology for studying of a model wind turbines with vertical axis of rotation - Darrieus, Savonius and hybrid configurations Darrieus-Savonius.

**Key words:** Darrieus rotor, Savonius rotor, Hybrid Darrieus-Savonius rotor.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Целта на настоящата работа е получаването на работните и аеродинамични характеристики на ротори с вертикална ос на въртене. Изследваните ротори могат да бъдат следните:

- *Дариус* (фиг. 1а). Важно предимството на този ротор е, че няма нужда от механизъм които да го ориентира по посоката на вятъра, а основен недостатък е нулевият пусков момент [4]. Други особености в работата на ротора са големията бързоходност, а в конструкцията използването на симетрични крилни профили: NASA 0012, NASA 0015, NASA 0018, NASA 0021 и други. Основната разлика между тях е относителната им дебелина (отношението между дебелината на профила и хордата).

- *Савониус* (фиг. 1б). Предимствата на тези ротори са, че не се нуждаят от механизъм за ориентирание по посока на потока и поради високия пусков момент се самостартират при ниски скорости на вятъра. Характерна особеност в работата на ротора е ниската честота на въртене [5]. Принципа на работа на турбината не позволява периферната скорост на ротора да превишава скоростта на въздушния поток. Посочените особености правят този ротор подходящ за пусков двигател на ротора на Дариус.

- *Хидридна конфигурация Дариус-Савониус* (фиг. 1в). Тази конфигурация обединява предимствата на двата ротора и осигурява висок пусков момент при ниска честота на въртене на ротора и ниска скорост на вятъра. След развъртане на турбината до номиналната честота на въртене основната част от въртящия момент се създава от ротора на Дариус.

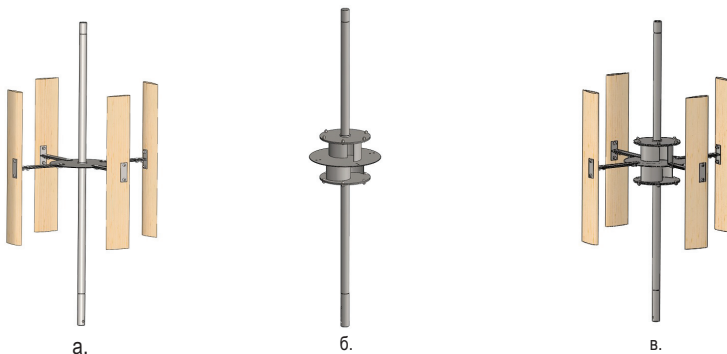
За постигане на поставената цел трябва да бъдат решени следните задачи:

- Измерване на скоростта на въздушния поток пред работното колело;
- Измерване на скоростта на въздушния поток през работното колело;
- Измерване на честотата на въртене на ротора;
- Определяне на мощността на вала на работното колело;
- Определяне на силата от челното налягане върху ротора (силата по направление на въздушния поток);
- Тарирание на датчиците за измерване на силата.

### ИЗЛОЖЕНИЕ

Определянето на силовото взаимодействие между движещ се въздушен поток и модела на ветроколелото се провежда в лабораторни условия. Въздушният поток се създава в аеродинамичен канал, с който се осигуряват различни постоянни скорости на потока [1].

Работните честотни характеристики на ветротурбините представляват зависимости между енергетичните показатели на ротора при различни постоянни скорости  $v$  на въздушния поток: въртящият момент на вала на ротора  $M = f(n)$ , силата от челното налягане  $F_x = f(n)$ , изходящата мощност  $P_{изх} = f(n)$ , където  $n$  е честотата на въртене на ротора.



**Фиг. 1 Ротори с вертикална ос на въртене**

а-Н-Ротор (Дариус); б-Савониус; в-Хибриден ротор Дариус-Савониус.

Скоростта на въздушният поток в аеродинамичния канал се определя косвено като се използва класическата измерителна схема тръба на Прандтл - диференциален микроманометър [2]:

$$(1) \quad v = \sqrt{\frac{2}{\rho_{ex}} p_{din}} \cdot \frac{m}{s},$$

където  $\rho_{ex}$  е плътността на въздуха;  $p_{din}$  – динамичното налягане на въздушния поток.

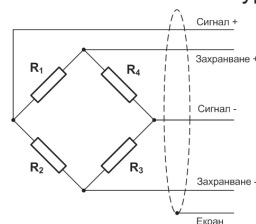
Диференциалният микроманометър има две скали – линейна и ъглова. По неговите показания се пресмята *динамичното налягане*:

$$(2) \quad p_{din} = \rho_{сп} g \frac{l}{1000} \sin \alpha, Pa$$

където  $\rho_{сп} = 890 \text{ kg/m}^3$  е плътността на спирта (течността в манометъра);  $l$  – показанието на линейната скала на уреда;  $\sin \alpha$  е настройката на ъгловата скала на уреда.

Със същата измерителна схема се определя скоростта на въздушния поток през работното колело. За целта тръбата на Прандтл се закрепва към координатник, който я позиционира в различни точки от ометената област на ротора. Позиционирането се осъществява чрез изместване на скоростомерната тръба по направление на радиуса и височината на ротора. В резултат на тези измервания се получават диаграмите на разпределения на скоростта на потока в различни хоризонтални сечения на работното колело.

Силата от челното налягане  $F_x$  и тангенцианата компонента  $F_T$  на аеродинамичната сила, която създава въртящия момент  $M$  се измерват косвено посредством тензометрични датчици. Челната сила  $F_x$  се измерва чрез четири тензометрични датчика, чиито сигнали се подават в обединителна кутия, където се събират и осредняват стойностите им. Ползваните датчици са свързани в схема пълен мост на Уитстон (фиг. 2), с която се получава пълна температурна компенсация и в резултат висока точност и стабилност на измерванията. Сигналите от тензометричните датчици се усилват с тензоусилвател TF - Messgerät für Mechanische Größen № 2302 на фирма IEMI (фиг. 3в) и се подават към контролер SIEMENS SIMATIC S7 224 (фиг. 3г). Контролера разполага с четиринадесет цифрови входа и четири аналогови. Езикът за програмиране на контролерът е STEP 7 Micro, въз основа на който е разрабо-



**Фиг. 2 Пълен мост на Уитстон**

тена програма за запис на отчитаните сигнали. Тя обработва сигналите и представя получените резултати в размерен вид в електронна таблица (Microsoft Excel).

Тензометричните датчици (фиг.3а) са произведени от фирма ZEMIC [9] и имат следните технически данни: максимална измервана сила 30 kg , коефициент на тензочувствителност  $k = 2.0 \pm 0.2, mV/V$  , клас на точност С3 [6], комбинирана грешка - 0.02 % , работа с пълно температурно компенсиране в границите от  $-10^{\circ}C$  до  $+40^{\circ}C$  .



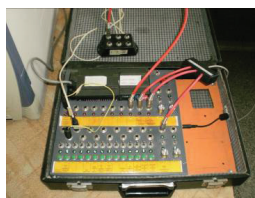
а.



б.



в.



г.

**Фиг. 3 Измерителна апаратура**

а-тензометричен датчик; б-Индуктивен датчик; в-Тензоусилвател; г-Контролер

Въртящият момент се измерва чрез пенделгенератор който е пряко свързан с вала на ротора. Корпусът на генератора е освободен от рамата на уредбата, което позволява тангенциалната сила, създаваща въртящия момент посредством прът разположен на разстояние  $l$  относно оста на ротора, да се предаде също на тензодатчик. Записа на сигналите от този тензодатчик в електронна таблица на Microsoft Excel се осъществява със същата блок схема както при силата от челното налягане. Различното в случая е, че програмата, която управлява записа на сигналите решава уравнението [3]:

$$(3) \quad M = F_T l, Nm.$$

Преди използването на тензодатчиците те се еталонират, като се определя връзката между стойностите на силата и електрическия сигнал. Еталонирането се осъществява с приспособления инсталирани на уредбата.

Честотата на въртене на вала на ветроколелото се измерва пряко, посредством индуктивен датчик (брояч). Индуктивният датчик представлява електронно устройство което формира на изхода си дискретен сигнал по безконтактен начин, под въздействието на приближаващ се метален предмет към активната му повърхност (фиг. 3б). Индуктивният датчик е произведени от фирма *СТС Електроникс ООД* [8] и има следните технически данни: захранващо напрежение 10...30 V, температура на експлоатация:  $-10... +70^{\circ}C$ , максимален изходен ток 200 mA, виброустойчивост 10...55 Hz амплитуда 1 mm.

Сигналът от индуктивния датчик без усилване се подава пряко към цифровия вход на контролера и се записва в електронната таблица във форма на честота на въртене  $n$ ,  $min^{-1}$  и ъглова скорост:

$$(4) \quad \omega = \frac{\pi}{30} n, s^{-1}.$$

Мощността на въздушния поток, която се явява входяща за ветроколелото се определя по зависимостта [7]:

$$(5) \quad P_{ex} = \rho_{ex} \frac{v^3}{2} S, W$$

където  $S = DH, m^2$  е лицето на ометената от работното колело площ;  $D, m$  е диаметър на ветроколелото;  $H, m$  е височина на ветроколелото.

Мощността на вала на работното колело, която е изходяща за ветроколелото се пресмята по зависимостта:

$$(6) \quad P_{узх} = M\omega, W.$$

Пресмятането се извършва автоматично в програмата на контролера за записване на данните в електронна таблица.

Въз основа на данните за енергетичните характеристики се построяват работните характеристики, от които след обезразмеряване се получават аеродинамичните характеристики на ветроколелото:  $C_{Fx} = f(\lambda)$ ,  $C_M = f(\lambda)$ ,  $C_p = f(\lambda)$ , където  $\lambda$  е бързоходността,  $C_{Fx}$  - коефициента на силата от челното налягане,  $C_M$  - коефициента на въртящия момент,  $C_p$  - коефициента на мощността.

*Бързоходността* е безразмерен коефициент представляващ отношение на периферната скорост на ротора към скоростта на въздушния поток:

$$(7) \quad \lambda = \frac{\omega R}{v}$$

където:  $R, m$  е радиуса на ветроколелото;  $v, m/s$  е скоростта на въздушния поток; известно е че бързоходността е функция на критерия на Струхал.

*Коефициентът на силата от челното налягане* се определя по зависимостта:

$$(8) \quad C_{Fx} = \frac{F_x}{\rho v^2 R H}$$

Известно е, че коефициента на силата от челното налягане е функция на критерия на Ойлер.

*Коефициентът на въртящия момент* се определя с формулата:

$$(9) \quad C_M = \frac{M}{\rho_{ex} v^2 R^2 H}.$$

Известно е, че коефициента на въртящия момент също е функция на критерия на Ойлер.

*Коефициентът на мощността* се определя по зависимостта:

$$(10) \quad C_p = \frac{P_{узх}}{P_{ex}} = C_M \lambda = C_p' \eta,$$

където  $C_p'$  е коефициентът на използване на енергията на ветроколелото;  $\eta$  - КПД на ветроколелото.

От (7), (9) и (10) следва че коефициентът на мощността е функция на критерия на Струхал и Ойлер.

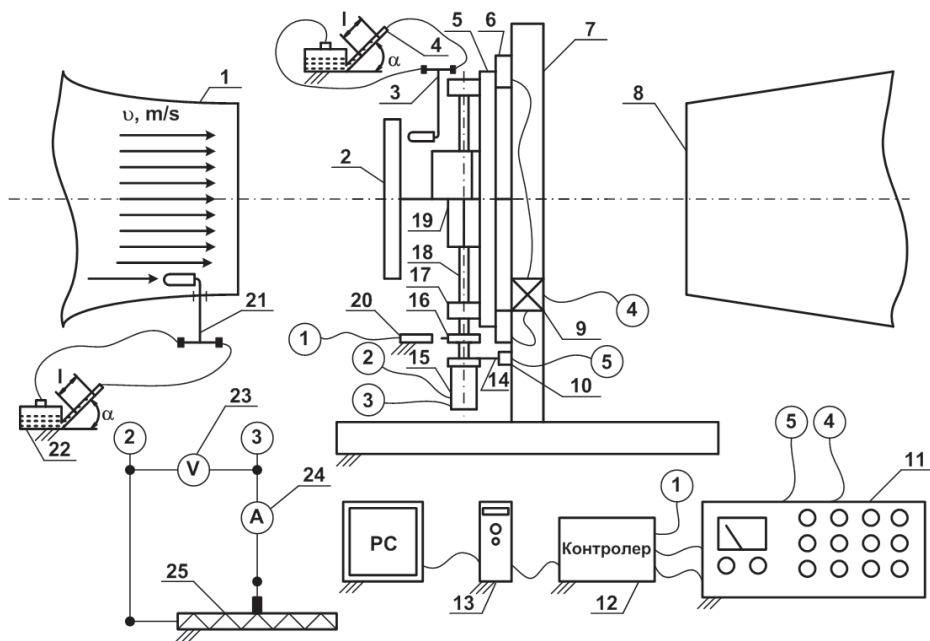
Връзката на безразмерните показатели на моделната ветротурбина с критериите за механично подобие означава, че аеродинамичните й характеристики важат за натурални машини, които са механично подобни на изследваната.

Силите на триене при турбинните машини се моделират с критерия на Рейнолдс. При режими на течения в автомоделната област те се самомоделират. Поради това е прието изследването на турбомашините да се извършва при стойности на Рейнолдс  $Re > 2.106$ .

Допълнителни изисквания към методиката за изследване на ветроколелото са: да има възможност за едновременно отчитане на енергетичните показатели (въртящ момент, честота на въртене, сила от челното налягане); да позволява провеждането на многофакторен експеримент (изследване влиянието на крилния профил, дължи-

ната, относителната дебелина, формата, ъгъла на установяване и броя на лопатките); лесно да се сменя вида на изпитвания модел; бързо да се настройва измервателната апаратура и параметрите на уредбата (балансиране на тензоусилвателя, натоварване на електрическия генератор, скоростта на въздушния поток).

Въз основа гореописаната методика и допълнителни изисквания за провеждане на изследването е изградена опитна уредба, представена на фиг.4. Уредбата включва аеродинамичен канал със затворен контур, работната област на който е открита и е с размери 0.45 x 0.45 x 0.765 m. Скоростта на потока в работната зона на аеродинамичния канал се регулира в границите 0..40 m/s, посредством безстепенна промяна честотата на въртене на осов вентилатор. Измерването ѝ се осъществява по схемата тръба на Прандтл 3 и микроманометър 4.



Фиг. 4 Опитна уредба

1 конфузор на аеродинамичния канал; 2 – ротор на Дариус; 3, 21 – тръба на Прандтл; 4, 22 – микроманометри; 5 – алуминиева рамка, вътрешна; 6 – един от четирите тензодатчика за определяне на силата от челното налягане; 7 – външна рамка (носеща рама); 8 – дифузор на аеродинамичния канал; 9 – събирателна кутия; 10 – тензодатчик за определяне на въртящия момент; 11 – усилвател; 12 – контролер; 13 – персонален компютър; 14 – прът; 15 – пенделгенератор; 16 – съединител, силфонен със щифт на периферията; 17 – лагерно тяло; 18 – вал на хибридният ротор; 19 – ротор на Савониус, двустъпален; 20 – индуктивен датчик; 23 – волтметър; 24 – амперметър; 25 – реостат.

Изследваното ветроколело 2 се разполага в работната област на аеродинамичния канал 1 на алуминиева рамка 5, която от своя страна се закрепва към носещата рама 7 посредством четири тензометрични датчика 6. Носещата рама се закрепва към фундамента. Пендел генераторът 15 се свързва към вала на работното колело 18 чрез силфонен съединител 16, осигуряващ компенсация на неточностите от изработването и монтажа. На периферията на съединителя се монтира метален щифт, който служи за котва на индуктивния датчик 20, с който се измерва честотата на въртене на ротора. За товарно устройство на пенделгенератора, съответно на ветроколелото се използва реостатът 25. Напрежението и тока в електрическата верига се следят с волтметра 23 и амперметра 24.

Експерименталното изследване на ветроколелото за получаване на честотните характеристики започва с установяване скоростта на въздушния поток ( $v_i = const$ ). За изменение на честотата на въртене ветроколелото се натоватва с електрически постоянен ток генератор и реостат. За всеки установен режим ( $v_i = const$ ,  $n = const$ ) на работа на ветроколелото се записват стойностите на честотата на въртене, силата от челното налягане, въртящия момент и мощността на вала. Изменението на честотата на въртене продължава до претоварване на ветроколелото, т.е. до честота на въртене нула.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектираната и изработена в Русенския университет опитна уредба за изследване на ветроколела с вертикална ос на въртене включва аеродинамичен канал с открита работна област със скорост на въздушния поток до 40 m/s и две компонентна аеродинамична везна. Конструкцията на уредбата позволява балансно изследване на мощността на ветроколелото. Освен това има възможност лесно да бъде модифицирана за изследване на осови ветроколела и обтечени тела с произволна форма като се измерват всички техни аеродинамични сили и въртящи моменти (общо шест на брой).

### ЛИТЕРАТУРА

[1] Ахмедов А., Кр. Тужаров, Г. Попов, И. Желева, К. Климентов, Ив. Николаев. Моделиране на течението в конфузора на аеродинамична тръба. В: Научни трудове на РУ "А. Кънчев", том 50, сер. 1.2, Русе, 2011, стр. 48-53, ISBN 1311-3321.

[2] Желева Ив., Г. Попов, Кр. Тужаров, Ив. Николаев, К. Климентов, М. Мижайлов. Ръководство за упражнения по механика на флуидите. Русе 2006.

[3] Попов Г., К. Климентов. Ръководство за упражнения по турбопомпи и вентилатори. Русе 2009.

[4] Тужаров Кр. Резултати от теоретичното пресмятане на характеристиката на ветроколело на Дариус. XIII Научна конференция ЕМФ 2008 на Техническия университет – София, том II, Созопол 2008, стр. 110..116.

[5] Тужаров, Кр., Г. Попов, Ив. Николаев, Кл. Климентов, М. Михайлов. Резултати от теоретичното пресмятане на характеристиката на ветроколело на Савониус. Научни трудове на Русенския университет, том 46, серия 1, 2007, стр. 108..115.

[6] Metrological regulation for load cells. International Organization of Legal Metrology OIML R 60, 2000.

[7] Paraschivoiu I. Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept, Polytechnic International Press, Canada; 1st edition, June 2002.

[8] [www.stselectronics.eu](http://www.stselectronics.eu)

[9] [www.zemic.nl](http://www.zemic.nl)

### За контакти:

Ахмед Ахмедов – докторант, Катедра „Топлотехника хидравлика екология“, Русенски университет „Ангел Кънчев“, e-mail: [aahmedov@uni-ruse.bg](mailto:aahmedov@uni-ruse.bg).

**Докладът е рецензиран.**