

Методика за изследване на ветроколела с вертикална ос на въртене

Ахмед Ахмедов

Methodology for Experimental Study of Wind Turbines with Vertical Axis of Rotation: The experimental methods for wind turbines performance investigation are divided into two major groups. The first group involves full scale wind turbines investigation at ambient field conditions. The second group involves laboratory investigation of scaled model wind turbines carried out in wind tunnel. A methodology for the laboratory investigation of a scaled model wind turbines with vertical axis of rotation - Darrieus, Savonius and hybrid configurations Darrieus-Savonius are presented in this study.

Key words: Experimental Investigation, Darrieus rotor, Savonius rotor, Hybrid Darrieus-Savonius rotor.

ВЪВЕДЕНИЕ

Цел 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. 1 а). 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]. Друга особености в работата на ротора е голямата бързоходност (λ), която е следствие от работния принцип на този тип ротори, а именно принципа на подемната сила. Най-широко са разпространени конструкциите на ветроколела използващи симетрични крилни профили: NASA 0012, NASA 0015, NASA 0018, NASA 0021 и др. Основната разлика между тях е относителната им дебелина (отношението между дебелината на профила и хордата).

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

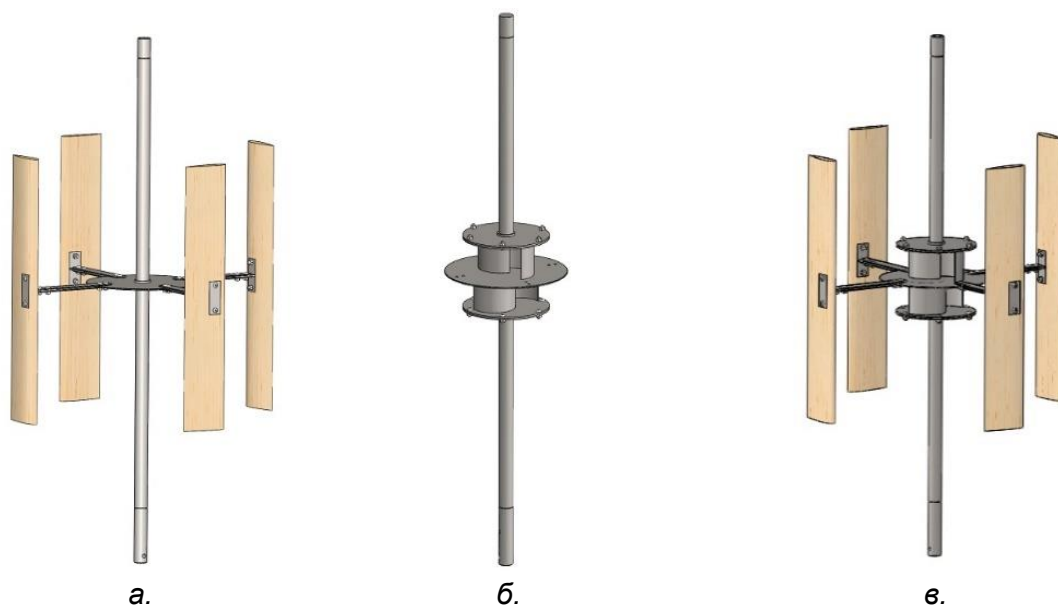
- **Хибридна конфигурация Дариус-Савониус** (фиг. 1 в). Тази конфигурация обединява предимствата на двете ветроколела, осигурявайки висок пусков момент при ниска честота на въртене на хибридният ротора и ниска скорост на вятъра. След развъртане на хибридната ветротурбина до номиналната честота на въртене основната част от въртящия момент се генерира 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].



Фиг. 1 Ротори с вертикална ос на въртене

а. *H-Ротор (Дариус); б. Ротор на Савониус; в. Хибриден ротор Дариус-Савониус.*

Работните честотни характеристики на ветротурбините представляват зависимости между енергетичните показатели на ротора при различни постоянни скорости v на въздушния поток. Енергетичните показатели на ротора са: въртящ 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.

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

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

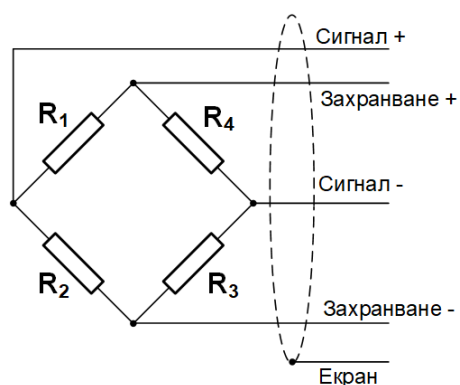
където $\rho_{вх}$ е плътността на въздуха; ρ_{din} – динамичното налягане на въздушния поток.

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

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

където $\rho_{сп} = 890 \text{ kg/m}^3$ е плътността на спирта (течността в манометъра); l е показаниято 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 ометения обем на ротора. Позиционирането се осъществява чрез изместване на скоростомерната тръба по направление на радиуса и височината на ветроколелото. В резултат на тези измервания се получават диаграмите на разпределения на скоростта на потока в различни хоризонтални сечения на работното колело.



Фиг. 2 Пълен мост на Уитстон

Силата от челното налягане F_x и тангенциалната 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. 3 в) и се подават към контролер SIEMENS SIMATIC S7 224 (фиг. 3 г). Контролерът разполага с четиринадесет цифрови входа и четири аналогови. Езикът за програмиране на контролерът е STEP 7 Micro, въз основа на който е разработена програма за запис на отчитаните сигнали. Програмата обработва сигналите и представя получените резултати в размерен вид в електронна таблица (Microsoft Excel).

Тензометричните датчици (фиг. 3 а) са произведени от фирма ZEMIC [9] и имат следните технически данни: максимално измервана сила 30 kg, коефициент на тензочувствителност $k = 2,0 \pm 0,2, mV/V$, клас на точност C3 [6], комбинирана грешка – 0,02%, работа с пълно температурно компенсиране в границите от -10°C до +40°C.

Въртящият момент се измерва чрез пендел-генератор който е пряко свързан с вала на ветроколелото. Корпусът на генератора е освободен от рамата на уредбата. Това позволява тангенциалната сила, създаваща въртящия момент, посредством прът разположен на разстояние l от оста на ротора, да се предаде на тензодатчик. Записа на сигналите от датчика в 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]:

$$(3) \quad M = F_T \cdot l, \text{ Nm.}$$

Тензодатчиците се еталонират, като се определя връзката между стойностите на действащите сили 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. 3 б). Индуктивният датчик е произведен от фирма СТС Електроникс ООД [8] и има следните технически данни: захранващо напрежение 10...30 V, температура на

експлоатация: $-10...+70^{\circ}\text{C}$, максимален изходен ток 200 mA, виброустойчивост 10...55 Hz, амплитуда 1 mm.

Сигналят 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:

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

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

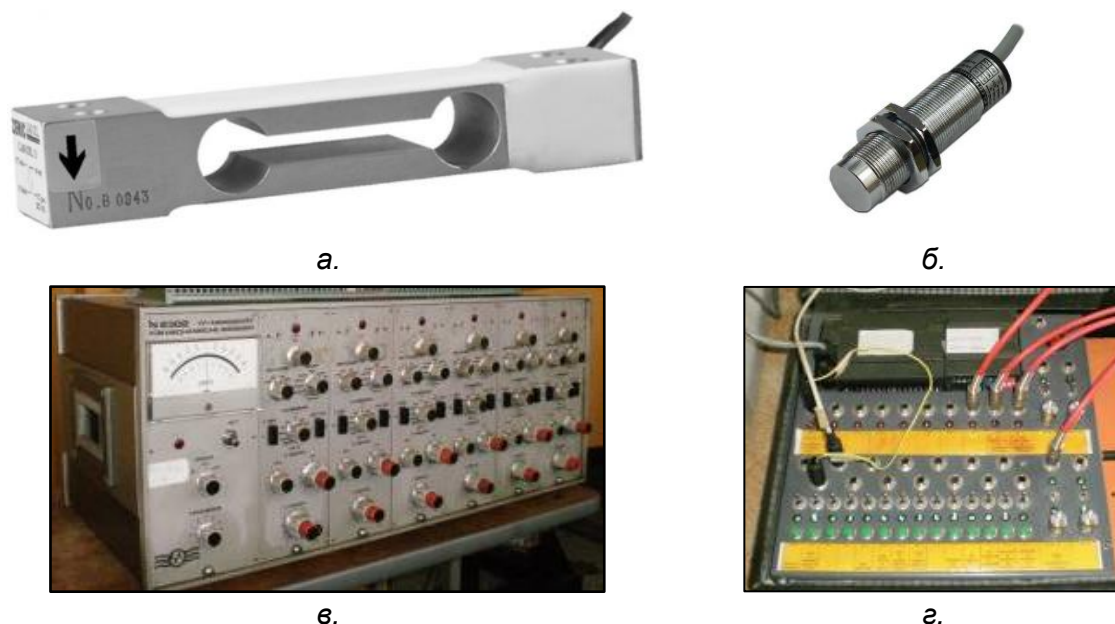
$$(5) \quad P_{\text{ex}} = \rho_{\text{ex}} \frac{v^3}{2} S, \text{ W},$$

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

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

$$(6) \quad P_{\text{изх}} = M\omega, \text{ W}.$$

Пресмятането се извършва автоматично в програмата на контролера за обработка и запис на данни. Резултатите се запазват в електронна таблица.



Фиг. 3 Измерителна апаратура

а. тензометричен датчик; б. индуктивен датчик; в. тензоусилвател; г. контролер

Въз основа на данните за енергетичните показатели 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 λ е бързоходност, 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:

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

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:

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

където C_p' е коефициентът на използване на енергията на ветроколелото; η - КПД на ветроколелото.

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

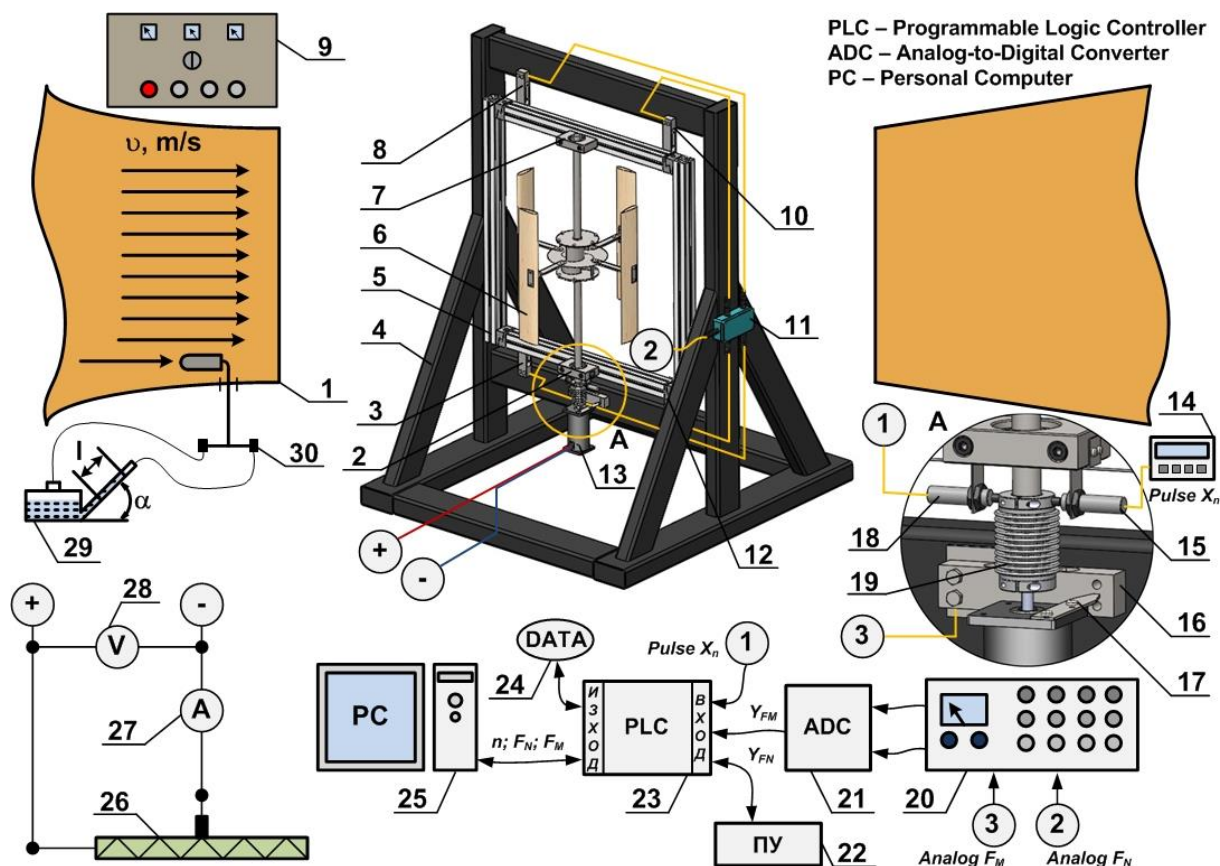
Връзката на безразмерните показатели на моделната ветротурбина с критериите за механично подобие означава, че аеродинамичните ѝ характеристики важат за натурални машини, които са механично подобни на изследваната.

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 $Re > 2 \cdot 10^6$.

Допълнителни изисквания към методиката за изследване на ветроколела са: да има възможност за едновременно отчитане на енергетичните показатели (въртящ момент, честота на въртене, сила от челното налягане); да позволява провеждане на многофакторен експеримент (изследване на влиянието на крилния профил, дължината, относителната дебелина, формата, ъгъла на установяване и броя на лопатките); лесно да се сменя типа на изпитваната моделна ветротурбина; 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 експериментални изследвания върху моделни ветротурбини с вертикална ос на въртене е проектирана и изградена опитна уредба представена на фиг. 4. Уредбата включва аеродинамичен канал със затворен контур, с открита работна област и 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 на честотата на въртене на осов вентилатор. Измерването ѝ се осъществява по схемата тръба на Прандтл 3 и микроманометър 29 и 30.



Фиг. 4 Схема на автоматизирана лабораторна уредба за изпитване на ВТВО

1 – Аеродинамичен канал с открита работна област; 2, 7 – Лагерни тела; 3, 8, 10, 12, 16 – Тензопреобразуватели на сила; 4 – Външна носеща рамка; 5 – Алюминиева рамка; 6 – Хибриден ротор Дариус-Савониус; 9 – Табло за управление на аеродинамичния канал; 11 – Събирателно табло; 13 – Пендел-генератор; 14 – Цифров честотомер; 15, 18 – Импулсни индукционни преобразуватели; 17 – Прът; 19 – Силфонен съединител; 20 – Усилвател; 21 – Аналогово-цифров преобразувател – ADC; 22 – Пулт за управление; 23 – Програмируем логически контролер – PLC; 24 – Независима памет на контролера; 25 – Персонален компютър; 26 – Товарно устройство (реостат); 27 – Амперметър; 28 – Волтметър; 29 – Диференциален микроманометър; 30 – Тръба на Прандтл.

Експерименталното изследване на ветроколелото (6) за получаване на честотните характеристики започва с установяване скоростта на въздушното течение ($v_i = const$) от таблото за управление (9). Измерването на силата от челното налягане F_N върху ветротурбина (6) е осъществено чрез разполагането ѝ в работната област на аеродинамичния канал (1) на алуминиева рамка (5), която от своя страна се закрепя към носещата рамка (4) посредством четири тензопреобразуватели на сила

(3), (8), (10) и (12). Челната сила върху ветроколелото се предава посредством алуминиевата рамка към тензометричните преобразуватели на сила. Те от своя страна преобразуват силата в аналогови електрически сигнали (Analog A_N). Тези сигнали се подават към обединително табло (11), където се събират и се осредняват стойностите им. Осредненият сигнал от изхода на обединителното табло (11) се подава към тензоусилвателя с аналогов индикатор (20), който го преобразува в стандартен аналогов сигнал $0 \div 20 \text{ mA}$. В следствие стандартният сигнал се подава към аналогово-цифровия преобразувател (21, ADC), който го дискретизира и превръща в 12 битово число Y_{FN} . Това число постъпва в програмируемия логически контролер (23, PLC) и той по предварително зададена преобразуваща функция $F_N = f(Y_{FN})$ го преобразува в сигнал Y_{FN} , породен от силата на челното налягане F_N . Усилвателят (20) служи и за визуалното отчитане на тази сила.

Свързаният към контролера пулт за управление (22, ПУ) се използва за настройване и управление на програмата за провеждане на периодичните измервания и нулиране на независимата памет на контролера (24, DATA). Персоналният компютър (25, PC) служи за следене работата на контролера (23) и извеждане на получените експериментални данни от паметта (24).

За измерване на въртящия момент M на ветротурбината се използва пендел генераторът (13), който се свързва към вала на ветротурбината (6) чрез силфонен съединител (19). Моментът на ветроколелото създава реактивен въртящ момент в статора на генератора (13) и посредством рамо се преобразува в сила на натиск върху тензометричния преобразувател на сила (16). Той от своя страна преобразува силата в аналогов електрически сигнал (Analog A_{FM}). Посредством усилвателя с аналоговия индикатор (20) този сигнал се преобразува в стандартен аналогов сигнал $0 \div 20 \text{ mA}$ и се подава към аналогово-цифровия преобразувател (21, ADC), който дискретизира сигнала и го превръща в 12 битово число Y_{FM} . Това число постъпва в контролера и той по предварително зададена преобразуваща функция $F_M = f(Y_{FM})$ го преобразува в силата F_M , породена от въртящия момент. Усилвателят (20) служи и за визуалното отчитане на тази сила.

На периферията на съединителя са монтирани метални щифтове, които служат за котва на два импулсни индукционни преобразуватели (15) и (18). Двата импулсни преобразувателя 15 и 18 преобразуват честотата на въртене n на ветроколелото в импулсен електрически сигнал (Pulse X_n) и го подават към честотомера (14) за визуално отчитане на тази величина, както и към контролера (23) за автоматичното ѝ отчитане.

За товарно устройство на пендел генератора, съответно на ветроколелото, се използва реостатът (26). За всеки установен режим ($v_i = \text{const}$, $n = \text{const}$) на работа на ветроколелото следените показатели (F_N , M , n) се отчитат автоматично от контролера. Натоварването продължава до претоварване на ветроколелото, т.е. до честота на въртене нула. Напрежението и токът в електрическата верига се следят с волтметъра (28) и амперметъра (27).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектираната и изработена в Русенски университет "Ангел Кънчев" опитна уредба за изследване на ветроколела с вертикална ос на въртене включва аеродинамичен канал с открита работна област, достигащ скорост на въздушния поток до 40 m/s и дву-компонентна аеродинамична везна. Конструкцията на уредбата позволява балансно изследване на мощността на различни типове ветроколела.

Освен това има възможност лесно да бъде модифицирана за изследване на ветроколела с хоризонтална ос на въртене 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. Михайлов. 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

[9] www.zemic.nl

За контакти:

Ахмед Ахмедов, катедра „Топлотехника хидравлика екология“, Русенски университет „Ангел Кънчев“, e-mail: aahmedov@uni-ruse.bg, aahmedov086@gmail.com.

Докладът е рецензиран.