

## Изследване на вертикална вятърна турбина със сдвоени работни лопатки

Валентин Обретенов

В работата са представени резултати от изследване на вертикална вятърна турбина тип Дариус с работно колело, синтезирано по нова аеродинамична схема (сдвоени работни лопатки). Чрез планиран физически експеримент (3 фактора/3 нива) са определени оптималните стойности на основния диаметър, ъгъла на поставяне и разстоянието между две сдвоени лопатки. Дефиниран е обобщен критерий за подобие при този тип работни колела. Представени са работни характеристики на турбината с два вида работни колела (с класически и сдвоени лопатки). Анализирани са резултатите от изследванията и възможностите за подобряване на ефективността на турбината.

**Ключови думи:** вятърна турбина, работно колело, планиран експеримент, характеристики.

### Study of a vertical axis wind turbine with double blades

Valentin Obretenov

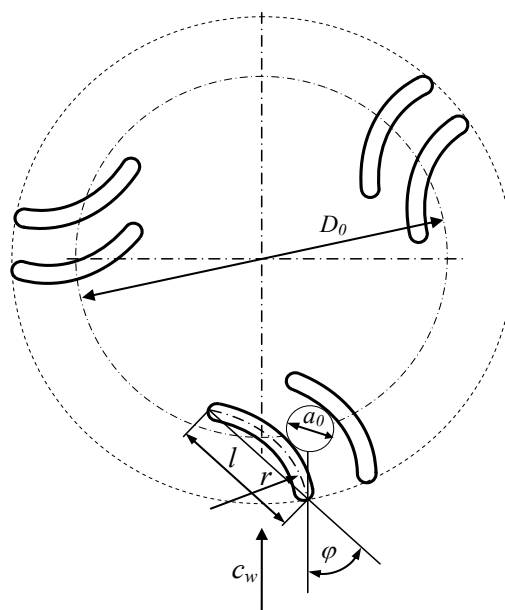
**Abstract:** The work presents the results of a study of vertical wind engine Darrieus type with runner synthesized a new aerodynamic scheme (with double blades). Through planned physical experiment (3 factors/3 levels) are set optimal values of the base diameter, angle of insertion of blades and the distance between two twin blades. Summarized defined criterion for similarity of this type runners. Presents the work characteristics of the turbine with two types of impellers (classic and twin blades). Analyzed the results of research and the possibilities for improving the efficiency of the engine.

**Keywords:** wind turbine, runner, planned experiment, characteristics.

### Въведение

Вертикалните вятърни турбини намират все по-широко приложение, а интересът към тях в последно време нарасна дори и в България. Сравнително ниската ефективност на работния процес ги прави приложими основно за малки мощности. В лабораторията по хидроенергетика и хидравлични турбомашини (ХЕХТ) на Техническия университет (София) от 2011г. вятърни двигатели от този вид са обект на системни изследвания. С цел осигуряване на възможност за провеждане на моделни изследвания беше проектиран и изграден лабораторен стенд, на който могат да бъдат изпитвани вертикални двигатели с диаметър до 1m [2,9]. Изследванията са насочени главно към повишаване ефективността на работния процес [5], разработване на методи и софтуер за синтез на лопатъчни системи [3], както и разработване и изследване на нови схеми на такива двигатели (напр. с вътрешен цилиндър).

В работата са представени резултати от изследвания, чиято цел е определяне на оптималните стойности на някои от основните параметри на работното колело на моделна вертикална вятърна турбина (по схемата на G.J.M.Darrieus, но със сдвоени работни лопатки). Идеята е да се направи конструкцията на тези двигатели по-компактна и технологична. Няма данни в реалната ветроенергетика подобна схема



Фиг. 1. Работно колело (лопатъчна система)

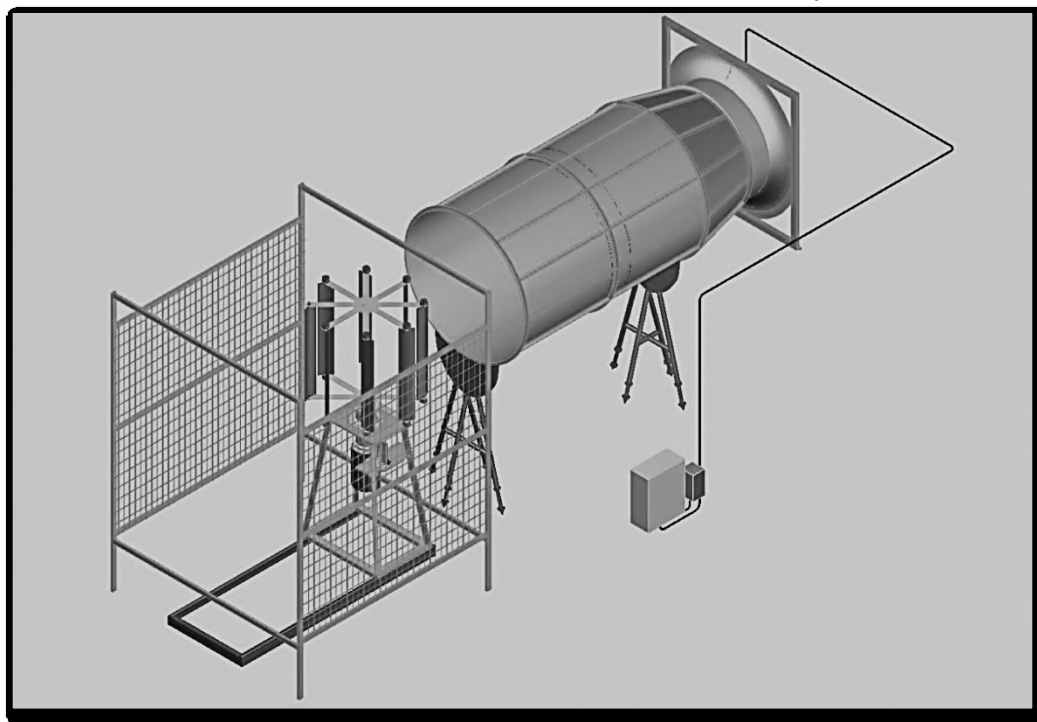
да е намерила приложение. Резултати от числени изследвания на работни колела, реализирани по такава схема се появиха едва в последно време [6].

На фиг.1 е показана схема на лопатъчната система на работно колело със сдвоени работни лопатки. В конкретния случай експериментите са направени с цилиндрични работни лопатки.

### Опитни изследвания

#### 1. Опитна уредба

Изследванията са направени на стенд №7С в лабораторията по хидроенергетика и хидравлични турбомашини [9] - фиг.2. На фиг.3 е показана фотография на моделния блок по време на работа на турбината. Конструкцията му позволява да бъдат извършвани широк спектър изследвания на лопатъчни системи на вертикални вятърни турбини.



Фиг.2. Стенд за изпитване на вятърни турбини с вертикална ос

В това изследване са използвани възможностите на стенда за изменение на следните параметри:

- брой на сдвоените комплекси ( $z$ );
- диаметър на работното колело ( $D_0$  – фиг.1);
- разстояние между две съседни работни лопатки ( $a_0$  – фиг.1).
- скорост на вятъра  $c_w$ ;
- ъгъл на поставяне на работните лопатки ( $\varphi$  – фиг.1).

#### 2. Планиран експеримент

Задачата на изследването е да бъдат определени оптималните стойности на разстоянието между две съседни сдвоени лопатки  $a_0$ , ъгъла на поставяне на лопатките в решетката на работното колело  $\varphi$  и диаметъра му  $D_0$  (фиг.1), като за целта е организиран планиран експеримент [1] (3 фактора, чиито стойности



Фиг.3. Моделен блок

варира на 3 нива). Първият фактор представлява отношение на разстоянието между две съседни лопатки към хордата на профила на лопатките ( $l=145mm$ ):  $X1=a_0/l$ . Вторият фактор ( $X2$ ) е ъгълът на поставяне на лопатките ( $X2=\varphi$ ), а третият – отношението на диаметъра  $D_0$  към височината на работното колело:  $X3=D_0/h$  ( $h=850mm$ ). Стойностите на основните нива и интервалите на вариране са определени на основата на резултати от опитни изследвания,

Таблица 1.

Фактор	Основно ниво	Интервал на вариране
X1, m	0.919	0.118
X2, deg	40.000	15.000
X3, mm	0.828	0.414

проведени в лабораторията ХЕХТ [3,7]. Тези стойности са дадени в табл.1. За определянето на оптималните стойности на трите величини се използва симетричен план [1] с брой на точките на носителя  $N=14$ . Оптимизационната задача се решава чрез комплексния метод на М.Вох [4], който е подходящ поради нелинейността на модела и наличието на ограничения във факторното пространство.

Тоталният екстремум на целевата функция се намира след многократно изчисляване при различни начални точки и сравняване на получените стойности. В конкретния случай целевата функция е т.нар. скоростно отношение TSR [5, 6, 7]. То представлява отношение на преносната скорост  $u$  в периферното сечение на работното колело към средната скорост на въздушното течение  $c_w$ . В теорията на водните турбини, по специално при активните турбини, тази величина се нарича режимен параметър (преносната скорост в този случай се пресмята за основния диаметър на работното колело). Известно е [5], че стойностите на коефициента на мощност при вертикалните вятърни турбини по принцип нарастват с увеличаването на TSR, особено за по-големи ъгли на атака. Всъщност параметърът TSR представлява реципрочната стойност на известното от теорията на подобие число на Strouhal ( $Sh=c/mD$ ):

$$TSR = \frac{u}{c_w} \tag{1}$$

Използва се регресионен модел от вида [1]:

$$Y = b_0 + \sum_{k=1}^3 b_k x_k + \sum_{l=k+1}^3 b_{kl} x_k x_l + \sum_{k=1}^3 b_{kk} x_k^2 \tag{2}$$

Изследваните работни колела са с 3 комплекта сдвоени лопатки, а скоростта на вятъра за всички опити се поддържа постоянна:  $c_w = 6.95 m/s$ .

### 3. Критерий за подобие

С цел осигуряване на възможност за обосновано прилагане на резултатите от моделните изследвания за проектиране на вертикални вятърни турбини от този тип е дефиниран нов за тези машини обобщен параметър, за който направените експерименти показваха, че оказва силно влияние върху стойностите на TSR. Използва се израза за т.нар. приведен еднометров дебит, известен от теорията на водните турбини [8], който по същество следва от числото на Euler:

$$Q_{11} = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}} \tag{3}$$

където  $Q$  е стойността на дебита,  $H$  – напора, а  $D_1$  – основния диаметър на работното колело.

В случая ефективната стойност на дебита през лопатките за един оборот на работното колело може да се представи по следния начин:  $Q=c_w \cdot a_0 \cdot h \cdot z$ , където  $h$  е височината на работното колело, а  $z$  е броят на сдвоените лопатъчни комплекси. Вятърните двигатели преобразуват кинетичната енергия на вятъра, следователно напорът (енергия, отнесена към

единица тегло) в този случай може да бъде представен по следния начин:  $H=c_w^2/2g$ . След заместване на  $Q$  и  $H$  в израза за  $Q_{II}$  и игнориране на  $(\sqrt{2g})$ , се получава:

$$Q_{II} = \frac{a_0 h}{D_0^2} z. \quad (4)$$

Горният израз може да бъде преобразуван, като в него се включи стъпката на сдвоените лопатъчни комплекси:  $t = \frac{\pi D_0}{z}$ . По този начин за  $Q_{II}$  се получава:

$$Q_{II} = \frac{\pi a_0 h}{D_0 t}. \quad (5)$$

## Резултати

### 1. Планиран експеримент

По-долу са приложени разпечатки на основните резултати от проведения планиран експеримент (за обработването на резултатите от експериментите е използван е специално разработен за целта софтуер): стойностите на регресионните коефициенти (P1) и оптималните стойности на управляващите параметри (P2):

P1.

```
<<< Regression coefficient : >>>
-----
b0=  2.214004
b1=  0.106749   b2= -0.008003   b3= -0.053185
b11= -0.031609  b22=  0.055441   b33=  0.161601
b12= -0.031305  b13=  0.013910   b23= -0.008358
Criterion of significance: Krbi=0.00239
-----
```

P2.

```
* OPTIMUM VALUES OF PARAMETERS : *
-----
No  *   NORMALIZED   *   REAL   *
-----
1   Xoptk= -1.0000   Xopt=  0.8010
2   Xoptk= -0.1158   Xopt= 48.2634
3   Xoptk= -0.3473   Xopt=  0.6839
-----
Model is adequate: Fi=0.00513; Fit=2.0300
```

Направена е проверка за значимост на регресионните коефициенти (P1), а също така и за адекватност на модела (F-критерий на Фишер - P2) [1,4].

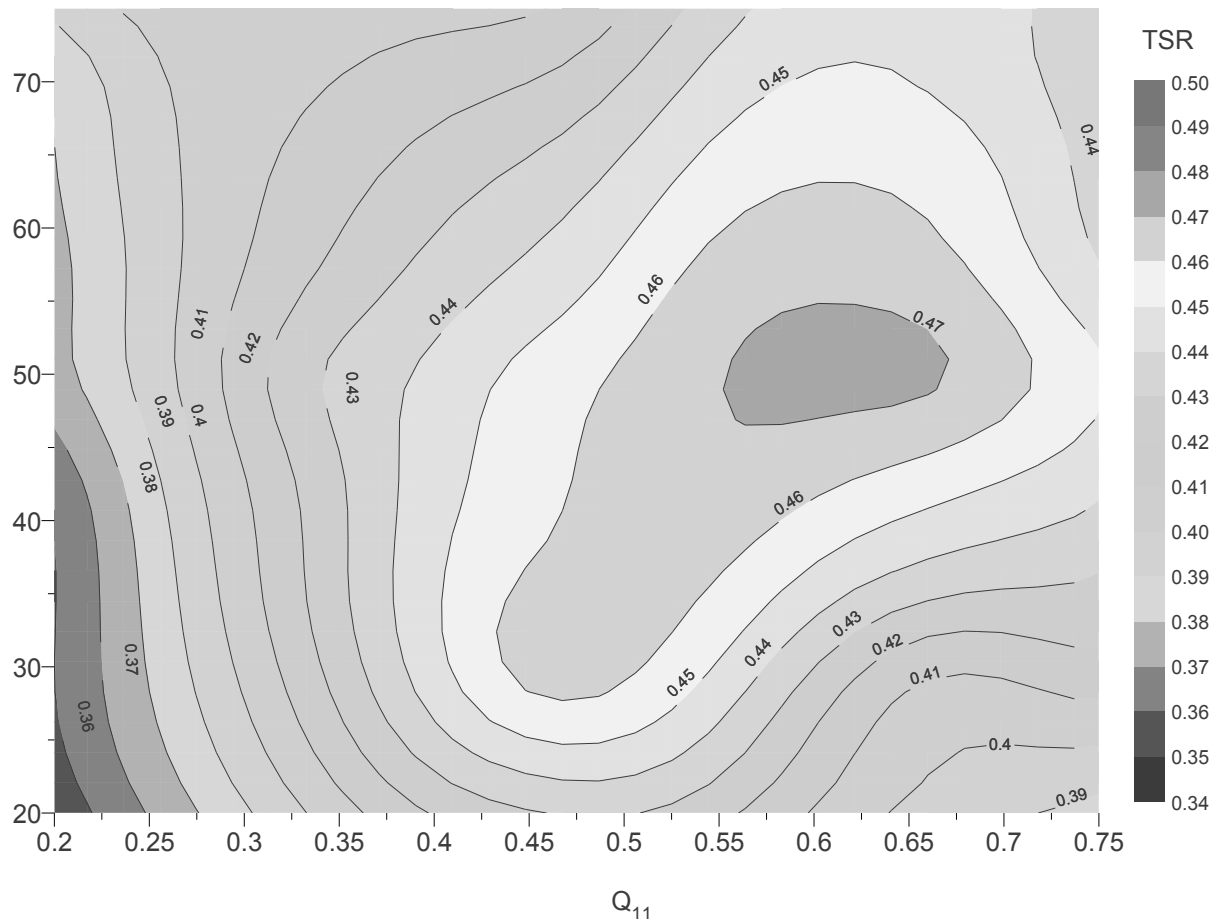
Резултатите от направения планиран физически експеримент показват, че оптималните стойности на трите параметъра са следните:

- Диаметър на работното колело:  $D_{0opt}=680mm$ ;
- Ъгъл на поставяне:  $\varphi_{opt}=48.26^\circ$ ;
- Разстояние между две съседни лопатки:  $a_0=99.17mm$ .

### 2. Универсална характеристика

С цел установяване влиянието на обобщения параметър  $Q_{II}$  на характеристиките на турбината, допълнително са проведени опитни изследвания (пълен факторен експеримент). Резултатите от тези изследвания позволяват да бъде определена зависимостта на TSR от

двата фактора ( $Q_{11}$  и  $\varphi$ ). На фиг. 5 е показана обобщената зависимост (универсална характеристика) на трите параметъра:  $TSR=f(Q_{11}, \varphi)$ .



Фиг.4. Обобщена зависимост

От фиг.4 се вижда, че най-високите стойности на TSR се получават за ъгъл на поставяне  $\varphi \approx 50^\circ$ , а експериментите показват, че максималната стойност е за  $Q_{11} \approx 0.57$ . Ако се пресметне стойността на  $Q_{11}$  с определените от планирания експеримент оптимални стойности на  $D_0$  и  $a_0$ , се получава  $Q_{11} \approx 0.55$ , т.е. очевидно е съответствието на резултатите от двата експеримента.

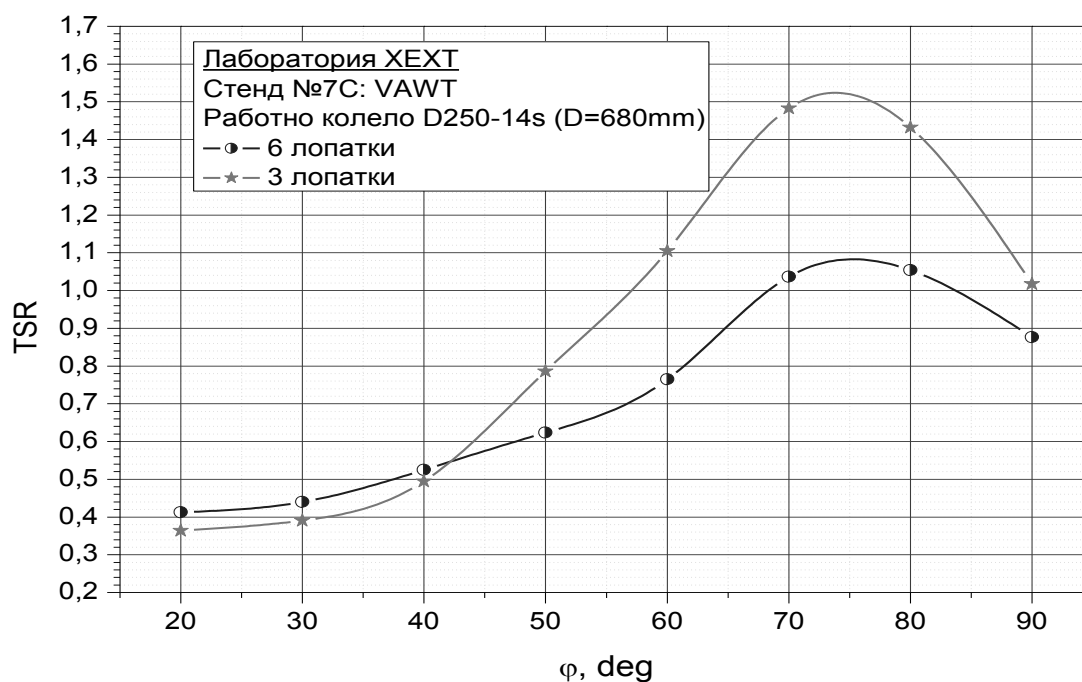
### 3. Сравнение на характеристики

С цел установяване влиянието на разгледания по същество нов тип работни колела върху работните характеристики на вертикалните вятърни турбини ос са проведени опитни изследвания. Задачата е да се определи работната характеристика  $TSR=f(\varphi)$  за двата вида работни колела (с класически и със сдвоени работни лопатки). На фиг.5 и фиг.6 са показани тези характеристики (за един и същ диаметър на работното колело:  $D_0=680mm$ ). Експериментите са направени с 3 и 6 лопатки при класическото работно колело, а за работното колело със сдвоени лопатки разстоянието между тях е съответно 60mm и 120mm.

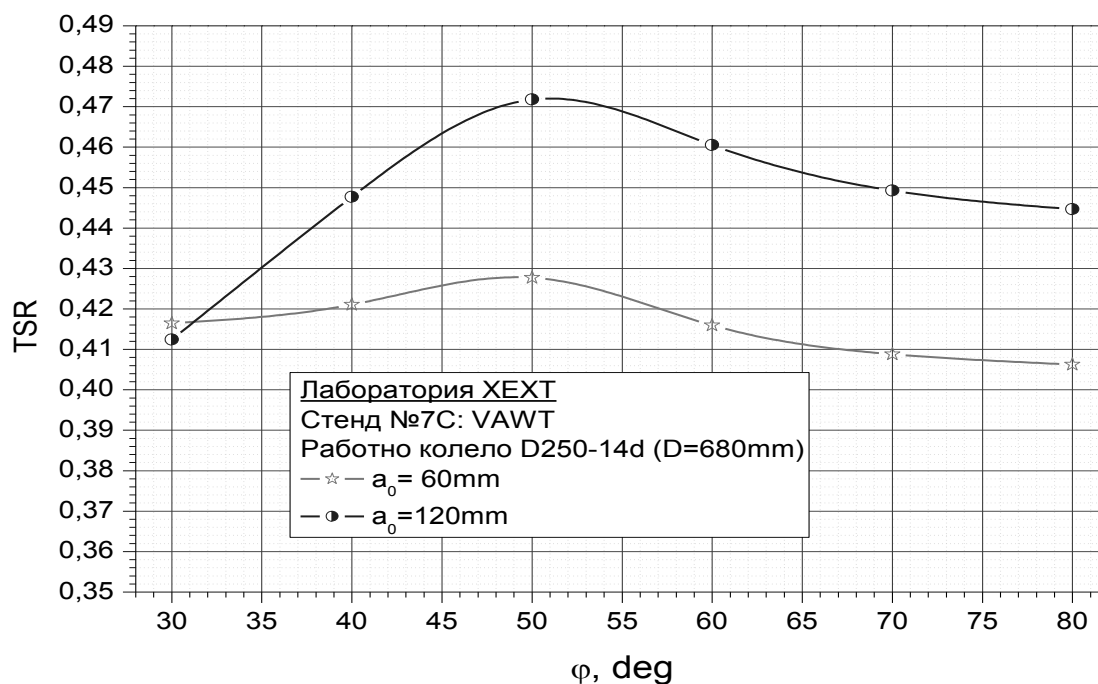
Сравнението на характеристиките показва следното:

- Стойностите на TSR са значително по-високи при класическото работно колело;
- Максималната стойност на TSR при работното колело със сдвоени лопатки е изместена в зона, за която ъглите на поставяне са с по-ниски стойности ( $\varphi_0 \approx 50^\circ$ ), в сравнение с класическото работно колело, за което  $\varphi_0 \approx 75^\circ$ ;

• Влиянието на ъгъла на поставяне на работните лопатки върху скоростното отношение TSR при работното колело със сдвоени лопатки е значително по-слабо в сравнение с класическото работно колело: относителното изменение на стойностите на TSR ( $\varepsilon = (TSR_{max} - TSR_{min}) / TSR_{min}$ ) при него е  $\varepsilon = 0.145$ , докато за класическото работно колело с 3 работни лопатки то е  $\varepsilon = 2.7$ , а за 6 лопатки  $\varepsilon = 1.67$  (индексите *max* и *min* означават съответно максималната и минималната стойност на TSR).



Фиг.5. Характеристики на турбината с класическо работно колело с 3 и 6 лопатки



Фиг.6. Характеристики на турбината с работно колело със сдвоени лопатки

### Заклучение

Основните резултати от настоящото изследване се изразяват в следното:

1. Изследвано е влиянието на основните геометрични и кинематични параметри на работното колело на вертикална вятърна турбина със сдвоени работни лопатки върху нейните характеристики.
2. На основата на резултатите от проведен планиран физически експеримент са определени оптималните стойности на диаметъра на работното колело, ъгъла на поставяне на работните лопатки и разстоянието между две съседни лопатки.
3. Сравнението на характеристиките на моделната турбина с работни колела със сдвоени и с единични работни лопатки показва забележими разлики в количествено и качествено отношение.
4. За осигуряване на условия за обосновано прилагане на резултатите от моделните изследвания при проектирането на вятърни турбини от този тип е дефиниран критерий за подобие и е изследвано влиянието му върху техните характеристики.

### Литература

1. Вучков И., С. Стоянов. Математическо моделиране и оптимизация на технологични обекти. С., Техника, 1980.
2. Обретенов В., Ц.Цалов, Й.Йорданов. Стенд за изпитване на вятърни турбини с вертикална ос. Научна конференция ЕМФ`2011, сборник доклади, т.ІІ, стр. 21-27, Созопол, 2011.
3. Обретенов, В., Ц.Цалов, Т.Чакърров. Вятърна турбина с вертикална ос. Научна конференция ЕМФ`2012, сборник доклади, т.ІІ, стр. 28-34, Созопол, 2012.
4. Стоянов Ст. Методи и алгоритми за оптимизация. Техника, С., 1990.
5. Benedict M., Lakshminarayan V., Pino J., Chopra I. Fundamental Understanding of the Physics of a Small-Scale Vertical Axis Wind Turbine with Dynamic Blade Pitching. An Experimental and Computational Approach 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, April 8-11, 2013, Boston, Massachusetts.
6. Chougule P., Ratkovich N., Kirkegaard P., Nielsen S. Design of rotor blade for vertical axis wind Turbine using double aerofoil. Indo-Danish International Conference on Wind Energy: Materials, Engineering, and Policies (WEMEP 2012), 22-23 November, 2012 Hyderabad, India.
7. Obretenov V. Experimental study of runners for vertical axis wind turbine. Proceedings of the Conference COFRET`12, pp.350-353, June 2012, Sozopol, Bulgaria.
8. Raabe J. Hydraulische Maschinen und Anlagen. Teil 2 (Wasserturbinen). VDI-Verlag, Dusseldorf, 1970.
9. <http://www.hydrolab.tu-sofia.bg>

### Автор:

Проф. д-р Валентин Сл. Обретенов

Тел.: +359 2 965 2333

E-mail: [v\\_obretenov@tu-sofia.bg](mailto:v_obretenov@tu-sofia.bg)

ТУ – София, кат. "Хидроаеродинамика и хидравлични машини"