

## Вихров и каскаден модели за изследване на ветротурбини с вертикална ос на въртене тип Дариус

Ахмед Ахмедов, Красимир Тужаров, Генчо Попов,  
Иванка Желева, Климент Климентов, Ивайло Николаев

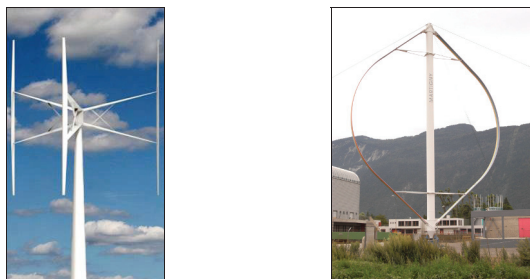
*Theoretical models for study of wind turbines with vertical axis of rotation, type Darrieus: The work gives an overview of the methods for aerodynamic study of the flow in wind turbines Darrieus in order to resolve the rights and inverse problem in their design. The advantages and disadvantages of different methods and fields of application are indicated.*

**Keywords:** Wind power, Darrieus rotor, Theoretical models.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Инвестициите във вятърната енергия от страните членки на Европейския съюз се очаква да нараснат през следващите 20 години, достигайки 20 милиарда евро през 2030 година [3]. Децентрализираното производство на електроенергия е важен подход за развиването на „интелигентна“ електрическа мрежа, насочена към приложение в градски условия. Нуждата от поддържане на „екологични“ домакинства и новите Европейски норми, регулиращи този проблем допринесат за интегрирането на ветро-енергийните системи в сградите. В градските области въздушният поток е силно турбулизиран, с бързи промени в посоката и скоростта. При тези условия вятърните турбини с вертикална ос на въртене (ВТВО) имат предимства пред вятърните турбини с хоризонтална ос (ВТХО).

Това са причините, поради които през последните години интереса към ВТВО е завишен. Усилията на университети и изследователски центрове са довели до разработване на много варианти на аеродинамични модели за ВТВО. Те се използват за получаване на оптимални параметри за конкретен дизайн на ветроколелото, за прогнозиране на работните характеристики преди изработване на прототип. В доклада са разгледани най-често срещаните аеродинамични модели на ВТВО тип Дариус с прави лопатки (фиг. 1).



фиг. 1 Вятърни турбини Дариус

### ИЗЛОЖЕНИЕ

#### 1. Вихров модел

Вихровите модели представляват модели на потенциални течения основани върху изчисляването на скоростните полета при турбината, като се отчита влиянието на вихрите във вихровата дия на лопатките. Турбинните лопатки са представени като граница (подемна линия от вихри) силите върху която са определени с помощта на масив от данни за аеродинамичните коефициенти ( $C_L$ ,  $C_D$ )

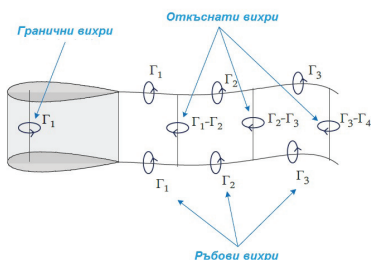
на крилния профил, изчислената относителна скорост ( $W$ ) на въздушния поток и ъгъла на атака ( $\alpha$ ).

Проста визуализация на вихрова система свързана с крилен елемент е показана на фиг. 2. Лопатката на ВТВО е представена от „гранична“ вихрова нишка наричана „заместител“ или подемна линия. Циркулацията (интензитета) на граничните  $\Gamma_1$  и ръбови  $\Gamma_2$  вихри са равни като следствие от вихровата теорема на Helmholtz [2]. Интензитета на разгърната вихрова система (фиг. 2) се изменя според теоремата на Kelvin [2] при всеки случай когато се откъсва напречен вихър от лопатката, чийто интензитет е равен на изменението в интензитета на граничния вихър.

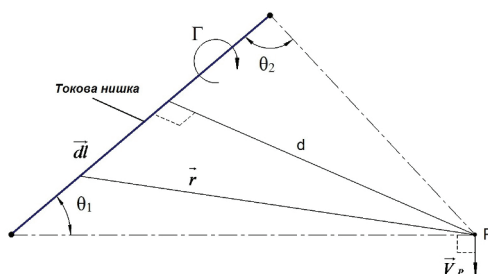
Скоростта на потока в произволна точка от флуидното поле е сума от скоростта в несмутената част от потока и скоростта индуцирана от всички вихрови нишки във флуидното поле. Индуцираната скорост в дадена точка от една токова нишка се определя посредством закона на Bio-Savart, който дава връзката между индуцираната скорост и интензитета на вихровата нишка. За права вихрова нишка (фиг. 3) с циркулация  $\Gamma$  и дължина  $l$  индуцираната скорост  $\vec{V}_p$  в точка  $P$  от нишката се определя чрез

$$(1) \quad \vec{V}_p = \vec{e} \frac{\Gamma}{4\pi d} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2),$$

където  $d$  е минималното разстояние от точка  $P$  до вихровата нишка;  $\vec{e}$  и  $\vec{r}$  - единичните вектори.



Фиг. 2 Вихрова система за елемент от лопатката



Фиг. 3 Скорост индуцирана в точка от вихрова нишка

В случай че точка  $P$  лежи на вихровата нишка, резултата е неопределим с уравнение (1), тъй като  $d$  е нула и стойността за  $\vec{V}_p$  клони към безкрайност. Скоростта индуцирана върху права вихрова нишка всъщност е равна на нула.

С цел да се затвори вихровия модел се извежда зависимост между циркулацията  $\Gamma_B$  на граничния вихър и индуцираната скорост  $W$  за елемент от лопатката. Приравняват се изразите за определяне на подемната сила  $L$  на крилния профил с теоремата на Jukowski ( $L = \rho W \Gamma_B l$ ) и с подемния коефициент  $C_L$  ( $C_L c l \rho \frac{W^2}{2}$ ) и се получава нужната връзка

$$(2) \quad \Gamma_B = \frac{1}{2} c C_L W,$$

където  $c$  е хордата на лопатката.

След определяне на разпределението на индуцираната скорост  $W$ , се определят работните характеристики на ВТВО [8].

Идеята за вихровия модел пръв представя Larsen [7] през 1975. Той е

двумерен, важи за с малки стойности на ъгълът на атака, пренебрегва загубата на подемна сила и се използва за изследване работата на  $H$  – ротори.

Аналогични са моделите на Fanucci и Walters [4], Holme [6] и Wilson [15]. Те доразвиват модела за леко натоварени бързоходни вятърни турбини с голям брой прави, много тесни лопатки с голямо отношение на височината към диаметъра (с цел течението да се разглежда като двумерно). През 1979, Strickland [12] разширява вихровия модел като го прави тримерен, и взема предвид аеродинамичната загуба на подемна сила. Неговото теоретично решение има добро съвпадение с експерименталните резултати за моментните (мигновени) стойности на силите действащи върху лопатките и вихровото течение близо зад ротора. Strickland [13] подобрява предходния модел (квази-стационарен вихров модел), включвайки динамични ефекти и го нарича динамичен вихров модел. Добавено е влиянието на динамичната загуба на подемна сила предизвикана от откъсването на потока, изменението на ъгъла на установяване и влиянието на масата на работното колело. Той повтаря експеримента с тестов модел [14] и получава значителни разлики в сравнение с предходните резултати. Корелацията между данните за локалните сили действащи върху лопатките и скорости на потока получени от динамичния вихров модел и тези от експеримента се припокриват добре в някой случай.

През 1984, Cardona [1] и Migliore [9] добавят в вихровия модел на Strickland [14] ефекта от изкривяване на потока и динамичната загуба на подемна сила от откъсване на потока. Новият модел показва по-добра корелация между изчислените и експериментални резултати за аеродинамичните сили и мощностния коефициент.

Недостатъците на вихровия модел са, че отнема много машинно време за изчисляване (симулиране) и се нуждае от значително опростяване – приема се потенциално течение след лопатките (във вихровата пътека), а вискозното влияние на потока върху аеродинамичните сили действащи върху лопатките се отчита чрез емпирични силови коефициенти [11].

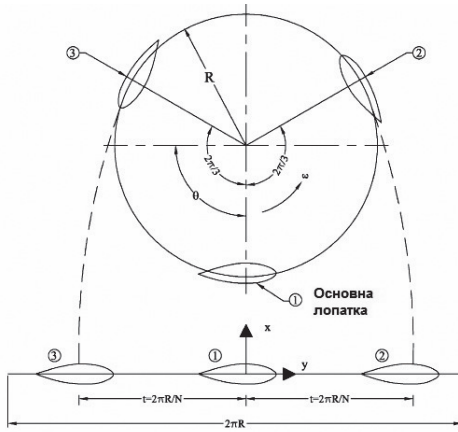
## 2. Каскаден модел

Цикличното равноотстоящо подреждане на няколко лопатки при турбомашините се нарича каскада. Каскадата и каскадното течение, е един от основните физически модели описващ работата на турбомашините, който за пръв път при изследването на ВТВО е предложен от Hirsch и Mandal [5]. При този модел се допуска, че крилните профили на турбината са разположени върху равнинна повърхност с интервали между лопатките равни на периферното разстояние между тях разделено на броя на лопатките (фиг. 4). Връзката между скоростта в несмутеното течение и скоростта във вихровата дия (смутеното течение) се установява чрез уравнението на Бернули, докато индуцираната скорост се обвързва със скоростта във вихровата дия (смутеното течение) чрез конкретен емпиричен израз.

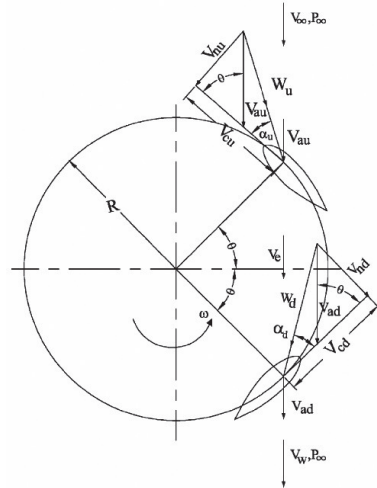
При този модел аеродинамичните характеристики на всеки елемент от лопатката се определят поотделно, както при двойния множествов потоко-тръбен модел за двата полу-цикъла на ротора срещу потока и по потока, като се отчита локалното число на Рейнолдс и локалния ъгъл на атака (фиг. 5). След определяне на локалната относителна скорост  $W$  на потока и ъгъла  $\alpha$  на атака ВТВО се разгръща в каскадна конфигурация (фиг. 4). Каскадата е разположена в равнина нормална към оста на турбината. Ако лопатката отбелязана с 1 при ъгъл на завъртане  $\theta$  се приеме за основна, параметрите на потока при другите две лопатки отбелязани с 2 и 3 се приемат за равни на тези при основната лопатка. Процесът продължава до едно пълно завъртане на основната лопатка със стъпка  $\delta\theta$ .

За да се намери индуцираната скорост се въвежда връзката между скоростта в смутения поток (вихровата пътека) и индуцираната скорост. За полу-цикъла срещу

потока се записва:



Фиг. 4 Разгръщане на лопатките в каскадна конфигурация



Фиг. 5 Скоростни триъгълници на ВТВО с прави лопатки тип Дариус в хоризонтално сечение за областите срещу и по потока

$$(3) \quad \frac{V_{au}}{V_{\infty}} = \left( \frac{V_e}{V_{\infty}} \right)^{k_i},$$

а за полу-цикъла по потока се записва

$$(4) \quad \frac{V_{ad}}{V_e} = \left( \frac{V_w}{V_e} \right)^{k_i},$$

където  $V_e$  и  $V_w$  са скоростите в смутеното течение в областите срещу и по потока. Стойността на степения показател  $k_i$  е определена въз основа на обработени експериментални данни. Отношението на индуцираната скорост за областта по потока се записва по следния начин

$$(5) \quad \frac{V_{ad}}{V_{\infty}} = \frac{V_{ad}}{V_e} \frac{V_e}{V_{\infty}} = \frac{V_e}{V_{\infty}} \left( \frac{V_w}{V_e} \right)^{k_i}.$$

Съгласно [5] изразът за степения показател  $k_i$  е приет като

$$(6) \quad k_i = (0.425 + 0.332\sigma),$$

където  $\sigma = NC/R$ .

Крайният израз за общия въртящ момент се получава от

$$(7) \quad T = \rho R^3 \frac{H}{R} \int_0^{2\pi} (W_2^2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 - W_1^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1) d\theta,$$

където  $W_1$  и  $W_2$  са относителните скорости на входа и изхода на каскадата.

Каскадният модел се използва при изследване на турбини с голяма и малка коравина и бързоходност, като се отчита изменението на локалното число на Рейнолдс за различни ъгли на завъртане (азимутни ъгли), подемно-съпротивителните коефициенти, влиянието на крайните размери и деформирането (изкривяването) на потока при изчислителния процес. Машинното време за провеждане на изчисленията е приемливо. Стойностите на моментните (мигновени)

сили действащи върху лопатките изчислени с настоящия модел показват по-добра корелация в сравнение с тези изчислени с конвенционалните моментни модели [10].

Моделът е доразвит от Mandal и Burton [8], като са взети предвид още два важни фактора, динамичната загуба на подемна сила (откъсването на потока) и деформирането на потока при променлив ъгъл на установяване. Изчисленияте стойности за скоростта в смутената част от потока (вихровата пътека) след тези модификации стават съпоставими с тези получени от комплексния динамичен вихров модел.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разгледаните в доклада аеродинамични модели са предназначени за анализ на конструкциите на вятърни турбини тип Дариус. Едни от най-широко използваните модели са вихровия и каскадният. Всеки от тези модела има своите предимства и недостатъци. От тях за най-точен според някои изследователи се счита вихровия, но той отнема много машинно време за провеждане на изчисленията. Каскадният модел дава добра конвергенция дори при висока бързоходност и голяма коравина, а точността му е задоволителна.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Тази работа е част от предвидените дейности по проект № MIS ETC 211: 2 (3i) -3.1-13: „Действия за подкрепа на нови научно-технически партньорства в трансграничната област с цел да обедини бизнеса и научните изследвания, за достъп до Европейски фондове САНДИ”, който е финансиран по Програмата за трансгранично сътрудничество Румъния България 2007– 2013.

**ACKNOWLEDGEMENTS:** This work is a part of the planned activities of the project № MIS ETC 211: 2 (3i) - 3.1-13: “Support Actions to create New RDI partnerships in trans-border area in order to bring together Business and Research for accessing European Funds” which is funded by the Program for cross-border cooperation between Romania and Bulgaria, 2007-2013

## Литература

- [1] Cardona JL. Flow curvature and dynamic stall simulated with an aerodynamic freevortex model for VAWT. Wind Eng 1984;8:135–43.
- [2] Currie IG. Fundamental mechanics of fluid. New York: McGraw-Hill; 1974.
- [3] European Wind Energy Association, “The economics of wind energy”, EWEA 2009.
- [4] Fanucci JB, Walter RE. Innovative wind machines: the theoretical performance of a vertical-axis wind turbine. In: Proceedings of the vertical-axis wind turbine technology workshop, Sandia laboratories, SAND 76-5586, iii-61-95, USA, 1976.
- [5] Hirsch H, Mandal AC. A cascade theory for the aerodynamic performance of darrieus wind turbines. Wind Eng 1987;11(3):164–75.
- [6] Holme OA. Contribution to the aerodynamic theory of the vertical axis wind turbine. International symposium. on wind energy systems, September 7th–9th, Cambridge, England, 1976. p. C4-55–71.
- [7] Larsen HC. Summary of a vortex theory for the cyclogiro. Proceedings of the second US national conferences on wind engineering research, Colorado state university, 1975. p. V8-1–3.
- [8] Mazharul Islam, David S.-K. Ting, Amir Fartaj, Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines.
- [9] Migliore PG, Wolfe WP, Fanucci JB. Flow curvature effects on Darrieus turbine blade aerodynamics. J Energy 1980;4(2):49–55.
- [10] Paraschivoiu, I., Double-multiple streamtube model for studying vertical-axis wind turbines, Journal of Propulsion and Power, 1988, 4(4), 370–377.
- [11] Pawsey NCK. Development and evaluation of passive variable-pitch vertical axis wind

- turbines. Doctoral thesis, The University of New South Wales. November 2002.
- [12] Strickland JH, Webster BT, Nguyen T. A Vortex model of the darrieus turbine: an analytical and experimental study. J Fluids Eng 1979;101:500–5.
- [13] Strickland JB, Webster B, Nguyen T. A Vortex model of the darrieus turbine: an analytical and experimental study. Technical report SAND81-7017, Sandia National Laboratory, 1981.
- [14] Strickland JH, Webster BT, Nguyen T. Vortex model of the darrieus turbine: an analytical and experimental study. American Society of Mechanical Engineers (Paper), n 79-WA/FE-6, 1979, 6p. ISSN:0402-1215 CODEN: ASMSA4, December 2–7.
- [15] Wilson RE. Wind-turbine aerodynamics. J Wind Eng Ind Aerodynam 1980:357–72.

**За контакти:**

Ахмед Ахмедов – докторант, Катедра „Топло хидро и пневмотехника“, Русенски университет „Ангел Кънчев“, e-mail: [aahmedov@uni-ruse.bg](mailto:aahmedov@uni-ruse.bg).

**Докладът е рецензиран.**