

МОДЕЛИРАНЕ И СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЯТЪРНА ТУРБИНА С ВЕРТИКАЛНА ОС НА ВЪРТЕНЕ - ТИП H-ROTOR

ЧАСТ 1 МОДЕЛ НА АЕРОДИНАМИЧНОТО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Калин АДЪРСКИ, Юлиян ГЕНОВ, Константин АРНАУДОВ

adarsky@yahoo.com, j_genov@mail.bg, askaro@tu-sofia.bg

катедра Механика, ТФ
ТУ – София, 1756, БЪЛГАРИЯ

В настоящето изследване се извежда модел на аеродинамичното взаимодействие на ветрогенераторна турбина с вертикална ос на въртене (VAWT) тип H – ротор. Изведени са зависимостите за скоростта на обтичане, ъгълът на атака и възникващите сили, като функции на: характеристиките на въздушния поток, ъгловата скорост и ъгълът на завъртане на турбината. За отчитане различията в обтичането в наветрената и подветрената зони, породени от взаимното аеродинамично влияние на перките, се използва многоканалния модел на двустранно – обтичане (DMST модел).

Ключови думи: вятърна турбина с вертикална ос (VAWT), аеродинамични канали

1. Въведение

Едно от основните предимства на VAWT е липсата на необходимост от ориентация по посоката на вятъра. При турбините с хоризонтална ос (HAWT) тя се осъществява от скъпоструващи сервосистеми. При средните и по-малки HAWT такива системи отсъстват (като се изключат турбините, работещи по посока на вятъра и самоориентиращите се мини турбини) и всяка промяна в посоката на вятъра по отношение на ориентацията на оста на турбината, води до неефективното ъ обтичане. Сериозно преимущество при поддръжката и ремонта, че оборудването: генератор, трансмисия и др., не се разполага на върха на кулата. Относително по-високите обороти на турбината, позволяват използването на редуктори с по-малки предавателни отношения или директно свързване на генератора, което води до по-ниски цени, по-равномерни динамични натоварвания в трансмисията и до редуцирани загуби. Като цяло те са много по-пригодни за работа в градска среда.

Недостатъци на VAWT са малкия пусков момент, блокиране при резки пориви на вятъра, проблеми с динамичната устойчивост, по-малка скорост на вятъра в следствие от ниската работна височина.

При завъртането на турбината, възникват вихри влияещи на входящия поток. През половината от цикъла на завъртане перките се обтичат от насрещен, а след това от попътен флуид. При подветрената фаза, върху лопатките действа въздушен поток, сблъскал се с, преминаващите през наветрената част лопатки, което е предизвикало турбулентност и промяна на посоката му. Така обтичането на лопатките се мени непрекъснато, както в следствие от изменящия се ъгъл на атака, така и поради взаимното аеродинамично влияние и засенчване. В резултат възникват пулсации във въртящия момент, респективно и в скоростта на въртене, дори и при постоянна скорост на вятъра.

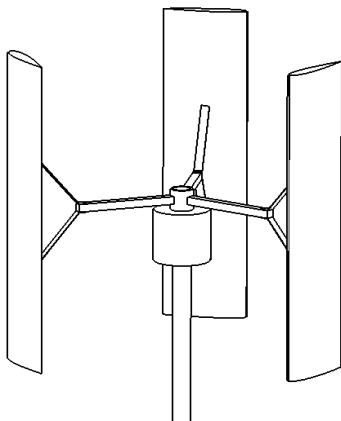
Компенсиране се търси чрез управление на работата и товара на генератора и на ъгъла на атака на лопатките (pitch control), зависещо от текущите стойности на скоростта на вятъра, ъгловата скорост на турбината и ъгълът на завъртане спрямо ориентация по посока на вятъра. При това освен повишаване ефективността и качеството на генерирана електроенергия се цели и снижаване на динамичните натоварвания в елементите на конструкцията, определящи надеждността и експлоатационния ресурс.

Решаването на тези задачи, изисква използването на адекватен модел на аеродинамичното взаимодействие.

Едни от първите подходи са предложени в [Paraschivoiu, I. (1988)] и се доразвиват в [Hansen M., (2008)], [Tong W., (2010)] и [Beri, H., Y. Yao, (2011)]. Като цяло те се основават на класическата BEM (Blade Element Model) теория. Числени подходи, решаващи уравненията на Навие-Стокс, чрез крайни елементи, са описани в [Homicz G., (1991) Ivanell S., (2009)].

Настоящата работа предлага аналитичен модел, чийто характеристики да могат да се идентифицират посредством резултати от натурен експеримент или от симулация на числен модел (предложен във втората част на разработката).

Разглежданата конструкция е тип „Darrieus H-rotor” – Фиг.1. Тя се състои от въртящи се около централна ос, вертикални крилни профили, свързани към главината посредством хоризонтални носачи (H-bar).



Фиг.1 Darrieus VAWT H rotor

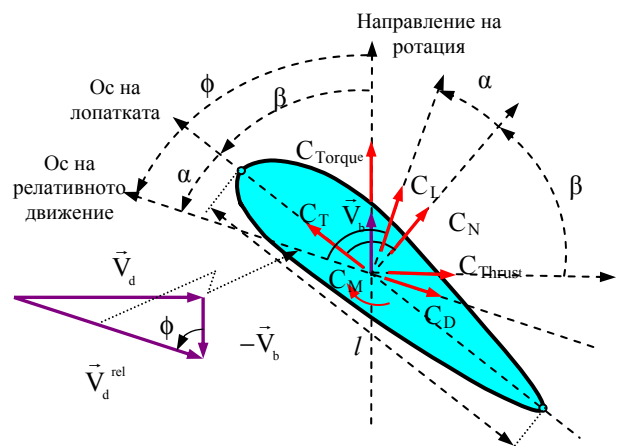
2 Характеристики на аеродинамичното взаимодействие на вятъра с витлата

На Фиг.2 са показани основните характеристики на аеродинамичното обтичане на едно сечение.

Обозначените параметри са следните:

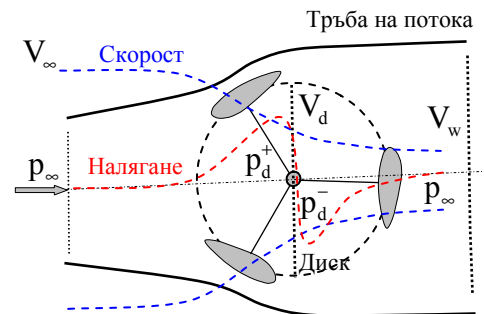
- V_d – скорост на вятъра в диска на турбината;
- $V_b = \omega_{wt} R$ – скорост на точките от перката по направление на тангентата;
- ω_{wt} – ъглова скорост на турбината;
- R – радиус на турбината;
- β – ъгъл на завъртане на лопатките (“Pitch” ъгъла);
- α – ъгъл на атаката;

- $\phi = \alpha + \beta$ – ъгъл на потока;
- C_N – коефициент на нормалната сила;
- C_T – коефициент на тангенциалната сила;
- C_L – коефициент на подемната сила;
- C_D – коефициент на силата от движещото налягане (сила на дърпане);
- C_{Torque} – коефициент на въртящата сила;
- C_{Thrust} – коефициент на аксиалната (тласкащата) сила;
- C_M – коефициент на усукващия момент;
- l – дължината на хордата.



Фиг.2 Характеристики на аеродинамичното обтичане

На Фиг.3 е показано изменението на въздушния поток при обтичането.



Фиг.3 Изменение на въздушния поток при обтичане на турбината

Тук определящи са три сечения:

- преди обтичане със скорост V_∞ ;
- в диска на турбината със скорост V_d ;
- в дърята на въздушната струя със скорост V_w .

Промяната на скоростта в диска на турбината може да се опише чрез зависимостта:

$$(1) \quad V_\infty - V_d = \tilde{a} V_\infty \Rightarrow$$

$$(2) \quad \tilde{a} = (V_\infty - V_d) / V_\infty.$$

където \tilde{a} е аксиален индукционен фактор.

За скоростите и аксиалната сила през диска, от теоремата за изменението на импулса и уравнението на Бернули, се получава:

$$(3) \quad \begin{aligned} V_d &= (1-\tilde{a})V_\infty, \quad V_w = (1-2\tilde{a})V_\infty, \\ F_A &= 4\tilde{a}(1-\tilde{a})0,5\rho A_d V_\infty^2 = C_A 0,5\rho A_d V_\infty^2, \end{aligned}$$

където:

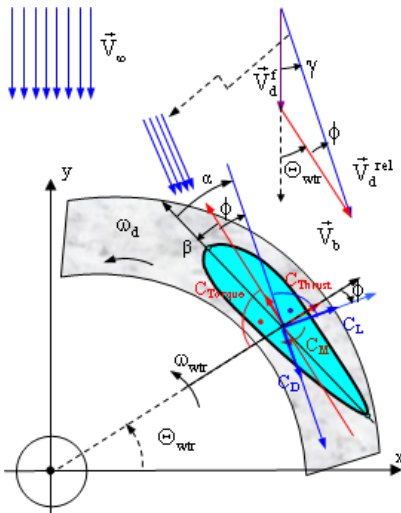
- ρ е масовата плътност на въздуха;
- $A_d = 2RH$ е площта на турбинния диск;
- H – дължина на лопатките.
- Мощността на турбината е:

$$(4) \quad P_{wtr} = F_A V_d = 4\tilde{a}(1-\tilde{a})^2 0,5\rho A_d V_\infty^3 = C_p P_{wtr}^i,$$

където:

- $P_{wtr}^i = 0,5\rho A_d V_\infty^3$ е идеалната мощност на турбината (при $V_d = V_\infty$ и $V_w = 0$);
- $C_p = 4\tilde{a}(1-\tilde{a})^2 = (1-\tilde{a})C_A$ - коефициент на мощността.

На Фиг.4 е показано обтичането на една перка в наветрената част. Разглежда се освен аксиалното и ротационното движение на флуидния поток.



Фиг.4 Обтичане на перките на VAWT

Допълнително обозначения са:

- V_d^f е скоростта на вятъра в наветрения диск;
- V_d^{rel} е скоростта на обтичането;
- ω_d е ъгловата скорост на флуидния поток след диска на турбината. Приема се, че ако преди диска тя е нула, то в равнината на диска ъгловата скорост ще е $0,5\omega_d$;
- Θ_{wtr} е ъгълът на завъртане на турбината.

Скоростта на обтичане и проекциите ѝ по осите на аеродинамичното взаимодействие (Фиг.2) са:

$$(5) \quad \vec{V}^{rel} = \vec{V}_d - \vec{V}_b,$$

като:

$$V_b = R(\omega_{wtr} + 0,5\omega_d) = (1+a')R\omega_{wtr} = (1+a')\lambda V_\infty,$$

$$V_d = (1-a)V_\infty,$$

$$V^{rel} = \sqrt{\underbrace{(1+a')^2 \lambda^2 + (1-a)^2 + 2(1-a)(1+a')\lambda \cos(\Theta_{wtr})}_{c_{rel}}} V_\infty.$$

В сила са следните зависимости:

(6)

$$\begin{bmatrix} V_x^{rel} \\ V_y^{rel} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \lambda \sin(\Theta_{wtr}) & 0 \\ -\lambda \cos(\Theta_{wtr}) & -1 \end{bmatrix}}_{A_{xy_\infty}} \begin{bmatrix} (1+a') \\ (1-a) \end{bmatrix} V_\infty$$

$$\begin{bmatrix} V_T^{rel} \\ V_N^{rel} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\lambda \cos(\beta) & -\cos(\Theta_{wtr} + \beta) \\ -\lambda \sin(\beta) & -\sin(\Theta_{wtr} + \beta) \end{bmatrix}}_{A_{TN_\infty}} \begin{bmatrix} (1+a') \\ (1-a) \end{bmatrix} V_\infty$$

$$\begin{bmatrix} V_{Thrust}^{rel} \\ V_{Torque}^{rel} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -\sin(\Theta_{wtr}) \\ -\lambda & -\cos(\Theta_{wtr}) \end{bmatrix}}_{A_{ThrustTorque_\infty}} \begin{bmatrix} (1+a') \\ (1-a) \end{bmatrix} V_\infty$$

$$\begin{bmatrix} V_D^{rel} = V^{rel} \\ V_L^{rel} = 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \lambda \cos(\alpha + \beta) & \cos(\gamma) \\ -\lambda \sin(\alpha + \beta) & -\sin(\gamma) \end{bmatrix}}_{A_{LD_\infty}} \begin{bmatrix} (1+a') \\ (1-a) \end{bmatrix} V_\infty$$

$$\begin{bmatrix} V_T^{rel} \\ V_N^{rel} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\sin(\Theta_{wtr} + \beta) & \cos(\Theta_{wtr} + \beta) \\ \cos(\Theta_{wtr} + \beta) & \sin(\Theta_{wtr} + \beta) \end{bmatrix}}_{A_{TN_{xy}} = A_{xy_{TN}}} \begin{bmatrix} V_x^{rel} \\ V_y^{rel} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_T^{rel} \\ V_N^{rel} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\sin(\beta) & \cos(\beta) \\ \cos(\beta) & \sin(\beta) \end{bmatrix}}_{A_{TN_{ThrustTorque}} = A_{ThrustTorque_{TN}}} \begin{bmatrix} V_{Thrust}^{rel} \\ V_{Torque}^{rel} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_T^{rel} \\ V_N^{rel} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sin(\alpha) & -\cos(\alpha) \\ \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \end{bmatrix}}_{A_{TN_{LD}}} \begin{bmatrix} V_L^{rel} \\ V_D^{rel} \end{bmatrix}$$

където:

$\lambda = R\omega_{wtr} / V_\infty$ е скоростното отношение на върха на турбината;

$a = f(\Theta)$ е стойността на аксиалният индукционен фактор за една лопатка в конкретното ѝ положение;

$a' = 0,5\omega_{wtr} / \omega_d$ - тангенциален индукционен фактор на турбината (приема се, че е постоянен за дадено λ);

$$\gamma = \Theta_{wtr} + \alpha + \beta = \arctg(V_x / -V_y) =$$

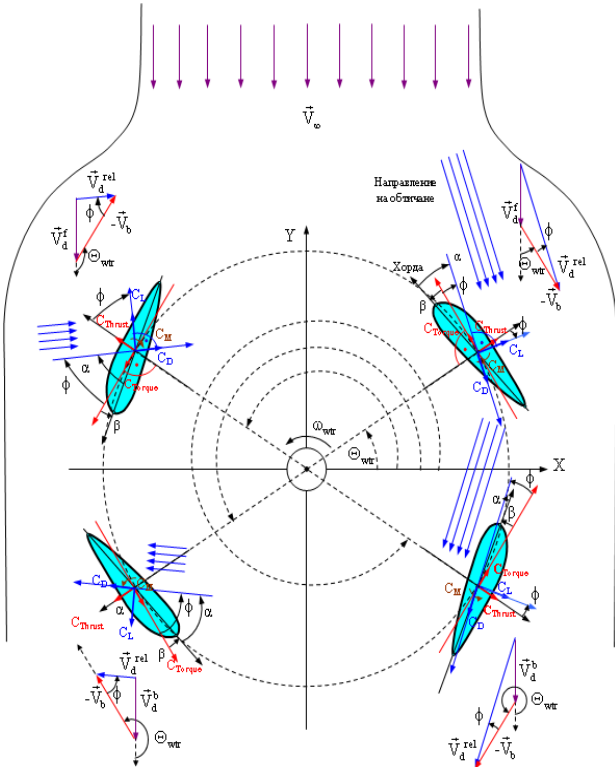
$$= \arctg \left(\frac{(1+a') \sin(\Theta_{wtr}) \lambda}{(1+a') \lambda \cos(\Theta_{wtr}) + (1-a)} \right)$$

Ъгълът на атака е:

$$\alpha = \arctg(V_N / -V_T) = \gamma - \Theta_{wtr} - \beta =$$

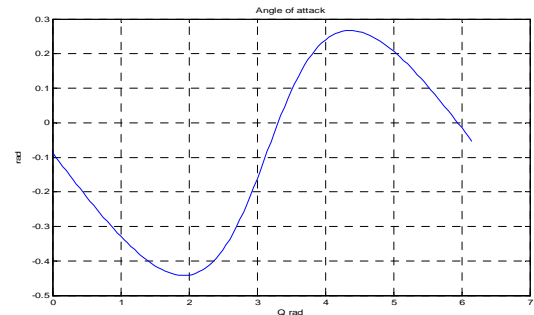
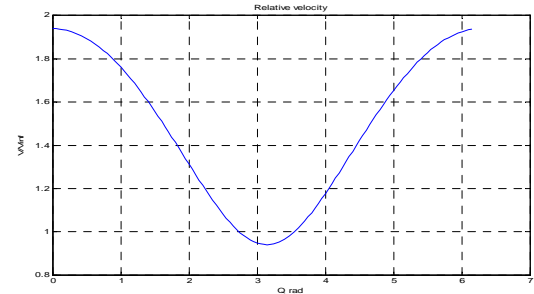
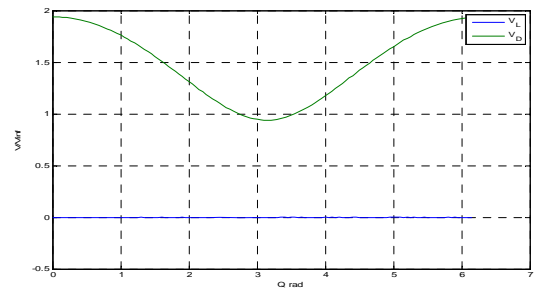
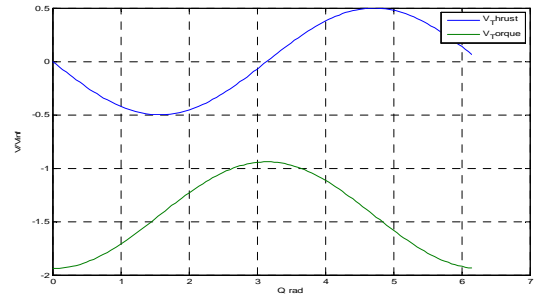
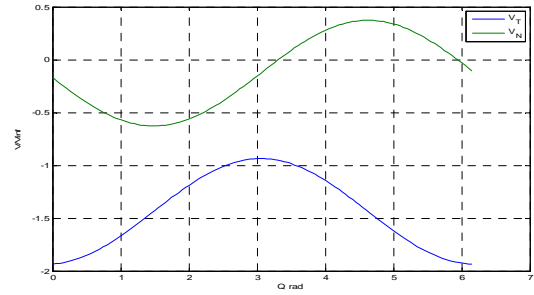
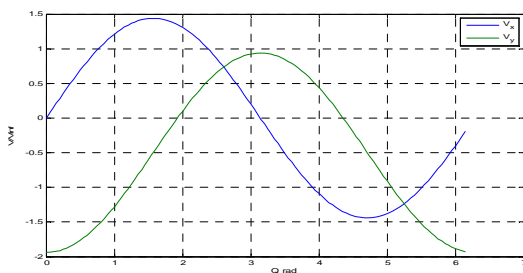
$$(7) = \arctg \left\{ \frac{(1+a') \lambda \sin(\beta) + (1-a) \sin(\Theta_{wtr} + \beta)}{-[(1+a') \lambda \cos(\beta) + (1-a) \cos(\Theta_{wtr} + \beta)]} \right\}$$

Скоростите на обтичане на една перка при едно завъртане е показано на Фиг.5.



Фиг.5 Обтичане на перките при пълен цикъл на завъртане

На Фиг.6 са показани примерни стойности на проекциите на скоростта на обтичане във функция на ъгълът на завъртане на турбината, съответно по оси X-Y, T-N, Thrust-Torque, L-D, както и модула на скоростта и изменението на ъгълът на атака за $\lambda=1,2$, $a=0,5$, $a'=0,2$, $\beta=5^0$.



Фиг.6 Скоростни характеристики на обтичането

При известни скорости на обтичане за всяко положение на перката, от (6) е възможно идентифицирането на индукционните фактори:

$$(8) \begin{bmatrix} (1+a') \\ (1-a) \end{bmatrix} = \frac{A_{xy_\infty}}{V_\infty}^{-1} \begin{bmatrix} V_x^{rel} \\ V_y^{rel} \end{bmatrix} = \frac{A_{TN_\infty}}{V_\infty}^{-1} \begin{bmatrix} V_T^{rel} \\ V_N^{rel} \end{bmatrix} = \frac{A_{ThrustTorque_\infty}}{V_\infty}^{-1} \begin{bmatrix} V_{Thrust}^{rel} \\ V_{Torque}^{rel} \end{bmatrix} = \frac{A_{LD_\infty}}{V_\infty}^{-1} \begin{bmatrix} V_D^{rel} \\ V_L^{rel} \end{bmatrix}.$$

Силите, действащи върху една перка могат да се представят като:

$$(9) \begin{cases} F_L(\Theta) = c_L F_0(\Theta), F_D(\Theta) = c_D F_0(\Theta) \\ F_{Thrust}(\Theta) = c_{Thrust} F_0(\Theta), F_{Torque}(\Theta) = c_{Torque} F_0(\Theta) \\ F_N(\Theta) = c_N F_0(\Theta), F_T(\Theta) = c_T F_0(\Theta) \\ F_x(\Theta) = c_x F_0(\Theta), F_y(\Theta) = c_y F_0(\Theta) \end{cases},$$

където: $F_0(\Theta) = c_{rel}^2 \sin(\Theta + \beta) 0,5\rho \ell H V_\infty^2$.

Връзката между коефициентите е

$$(10) \begin{bmatrix} c_T \\ c_N \end{bmatrix} = A_{TN_{xy}} \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} = A_{TN_{ThrustTorque}} \begin{bmatrix} c_{Thrust} \\ c_{Torque} \end{bmatrix} = A_{TN_{LD}} \begin{bmatrix} c_L \\ c_D \end{bmatrix},$$

и при известни сили, те могат да се идентифицират от (9).

Ако броят на перките се означи с B , сумарния въртящ момент ще бъде:

$$(11) T(\Theta) = C_{Torque}(\Theta) R 0,5\rho B \ell H V_\infty^2,$$

където:

$$C_{Torque}(\Theta) = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^B [c_{Torque}(\Theta + \varphi_i) c_{rel}^2(\Theta + \varphi_i) \sin(\Theta + \beta + \varphi_i)]$$

$$\varphi_i = (i-1)\Delta\varphi, \Delta\varphi = 2\pi/B.$$

Съответно за мощността се получава

$$(12) P_{wtr}(\Theta) = T(\Theta) \omega_{wtr} = C_{Torque}(\Theta) \lambda 0,5\rho B \ell H V_\infty^3 = C_{Torque}(\Theta) \lambda \sigma' 0,5\rho A_d V_\infty^3,$$

където $\sigma' = B H \ell / A_d = B \ell / 2R$ е коефициент на уплътняване.

От сравнението на (12) с (4), за коефициента на мощността и аксиалният коефициент се получава:

$$(13) C_p(\Theta) = 4\tilde{a}(1-\tilde{a})^2 = \lambda \sigma' C_{Torque}(\Theta), \\ C_A = \lambda \sigma C_{Torque}(\Theta) / (1-\tilde{a}),$$

като $\tilde{a}(\theta)$ е интегралния аксиален индукционен коефициент.

За частта непосредствено преди и след диска на турбината, разликата в наляганята ще отчита кинетичната енергия за завъртане на въздушния поток в сечението на диска:

$$p_d^+ + 0,5\rho(R\omega_{wtr})^2 = p_d^- + 0,5\rho[R(\omega_{wtr} + \omega_d)]^2 \Rightarrow \\ \Delta p_d = p_d^+ - p_d^- = \rho R^2 \left(\omega_{wtr} + \frac{\omega_d}{2} \right) \omega_d = 2\rho a'(1+a')(\lambda V_\infty)^2.$$

Аксиалната сила през диска е:

$$F_A = \Delta p_d A_d = 2\rho a'(1+a')\lambda^2 V_\infty^2 A_d.$$

Като се сравни горният израз с (3) се получава:

$$(14) \begin{cases} a'(1+a') = \tilde{a}(1-\tilde{a})/\lambda^2 \Rightarrow \\ a' = \sqrt{0,25 + \tilde{a}(1-\tilde{a})/\lambda^2} - 0,5. \end{cases}$$

Между проекциите на силата на аеродинамичното въздействие върху различните оси, съществуват зависимости аналогични на (10):

$$(15) \begin{bmatrix} F_T \\ F_N \end{bmatrix} = A_{TN_{xy}} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = A_{TN_{ThrustTorque}} \begin{bmatrix} F_{Thrust} \\ F_{Torque} \end{bmatrix} = A_{TN_{LD}} \begin{bmatrix} F_L \\ F_D \end{bmatrix}.$$

Ако са известни само силовите въздействия върху перките, идентификацията може да се извърши в следната последователност:

- При завъртане на турбината на ъгъл Θ , за който положенията на перките се определят от ъглите $\Theta + (i-1)\Delta\varphi$, $i=1,..,B$, се изчисляват:

$$- P_{wtr}(\Theta) = \lambda V_\infty \sum_{i=1}^B F_T(\Theta + \varphi_i);$$

$$- C_p(\Theta) = \frac{P_{wtr}(\Theta)}{0,5\rho A_d V_\infty^3};$$

- \tilde{a} като реален положителен корен на кубичното уравнение, получено от (13):

$$\tilde{a}^3 - 2\tilde{a}^2 + \tilde{a} - 0,25C_p = 0;$$

- a' от зависимост (14).

- Задават се начални стойности на аксиалните индукционни коефициенти - $a(\Theta + (i-1)\Delta\varphi)$, $i=1,..,B$ (например равни на \tilde{a});

- определят се ъглите на атака $\alpha(\Theta + (i-1)\Delta\varphi)$, $i=1,..,B$ от зависимост (7);

- изчисляват се коефициентите $c_{rel}(\Theta + (i-1)\Delta\varphi)$, $i=1,..,B$ от зависимост (5) и съответно и $F_0(\Theta + (i-1)\Delta\varphi)$, $i=1,..,B$ от (9);

- пресмятат се силите или коефициентите им и се сравняват с експериментално получени стойности;

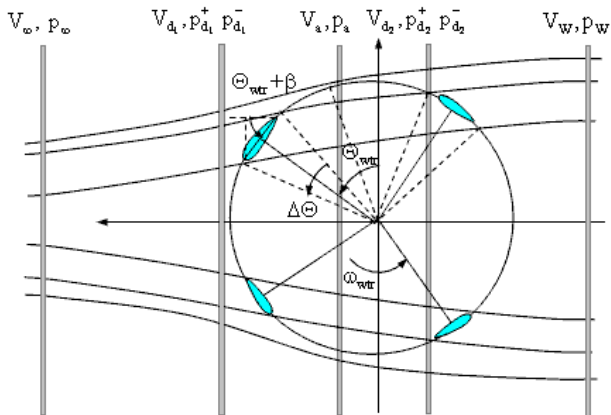
- цикъла се повтаря в контекста на оптимизационна процедура, до достигане на минимална разлика между изчислените и експериментално получените сили (или коефициенти);

- оптимизацията се повтаря за дискретни положения на турбината: $0, \Delta\Theta, 2\Delta\Theta, \dots, 2\pi / V$ (след $\Theta = 2\pi / V$ се получава повторение на аеродинамичните взаимодействия).

- като краен резултат се получава зависимостта за $a(\Theta)$ за един оборот на турбината, при зададените стойности на λ и β .

3 Многоканален двустранен модел на обтичане.

Този модел [Paraschivoiu, I. (1988), Tong W., (2010), Beri, H., Y. Yao, (2011) и др.] се различава от предложението по-горе подход, по това, че въздушният поток се разбива на флуидни канали – Фиг.7, като условията на обтичане в даден канал се приемат за постоянни и се различават само по това дали перката се намира в подветрената страна (входния диск d_1) в наветрената страна (изходния диск d_2).



Фиг.7 Обтичане при многоканалният двустранен модел

Ако броят на каналите е n , то ъгловата стъпка за формиране на каналите ще бъде

$$(15) \quad \Delta\Theta = \pi / n,$$

а ширината на каналите в предния диск:

$$(16) \quad \begin{aligned} l_i &= 2R \sin((i-0,5)\Delta\Theta) \sin(0,5\Delta\Theta) \approx \\ &\approx R\Delta\Theta \sin((i-0,5)\Delta\Theta), \quad i=1, \dots, n. \end{aligned}$$

Разглежданите положения на обтичане на перките ще са за ъглите на завъртане на турбината:

$$(17) \quad \Theta_{wtr}^{(i)} = \pm(i-0,5)\Delta\Theta = (i-1)\pi / n, \quad i=1, \dots, n.$$

Между входния и изходния диск се разглежда междинен диск, при който налягането на потока става равно на свободния поток $p_a = p_\infty$. Така от уравнението на Бернули ще са в сила зависимостите:

$$(18) \quad \begin{cases} 0,5\rho V_\infty^2 + p_\infty = 0,5\rho V_{d_1}^2 + p_{d_1}^+ \\ 0,5\rho V_{d_1}^2 + p_{d_1}^- = 0,5\rho V_a^2 + p_\infty \\ 0,5\rho V_a^2 + p_\infty = 0,5\rho V_{d_2}^2 + p_{d_2}^- \\ 0,5\rho V_{d_2}^2 + p_{d_2}^+ = 0,5\rho V_w^2 + p_\infty \end{cases}$$

Ако се въведат аксиални индукционни фактори на входния и изходящия диск като:

$$(19) \quad a_{d_1} = (V_\infty - V_{d_1}) / V_\infty, \quad a_{d_2} = (V_a - V_{d_2}) / V_a,$$

скоростите имат представянето:

$$(20) \quad \begin{cases} V_{d_1} = (1 - a_{d_1}) V_\infty \\ V_a = (1 - 2a_{d_1}) V_\infty \\ V_{d_2} = (1 - a_{d_2}) V_a = (1 - 2a_{d_1})(1 - a_{d_2}) V_\infty \\ V_w = (1 - 2a_{d_2}) V_a = (1 - 2a_{d_1})(1 - 2a_{d_2}) V_\infty \end{cases}$$

Надлъжната сила на аеродинамично взаимодействие ще бъде:

$$(21) \quad F_y(\pm\Theta_i) = c_y(\pm\Theta_i) F_0(\pm\Theta_i),$$

като участващите функции се получават от изведените вече зависимости, съответно за входящия и изходящия диск:

$$(22) \quad \begin{aligned} F_0(\Theta_i) &= c_{rel}^2(\Theta_i) 0,5\rho l_i H V_\infty^2 \\ F_0(-\Theta_i) &= c_{rel}^2(-\Theta_i) 0,5\rho l_i H (1 - 2a_{d_1})^2 V_\infty^2 \\ c_{rel}^2(\Theta_i) &= \lambda^2 + (1 - a_{d_1}(\Theta_i))^2 + 2(1 - a_{d_1}(\Theta_i))\lambda \cos(\Theta_i) \\ c_{rel}^2(-\Theta_i) &= \lambda^2 + (1 - a_{d_2}(-\Theta_i))^2 + 2(1 - a_{d_2}(-\Theta_i))\lambda \cos(-\Theta_i) \end{aligned}$$

При неизвестен коефициент $c_y(\pm\Theta_i)$, той може да се определи чрез другите коефициенти от (6):

$$c_y(\Theta_i) = \cos(\Theta_i + \beta) c_T(\Theta_i) + \sin(\Theta_i + \beta) c_N(\Theta_i).$$

От друга страна за надлъжната сила във флуидният поток може да се запише:

$$F_A(\Theta_i) = 4a_{d_1}(\Theta_i)(1 - a_{d_1}(\Theta_i)) 0,5\rho A_1 V_\infty^2$$

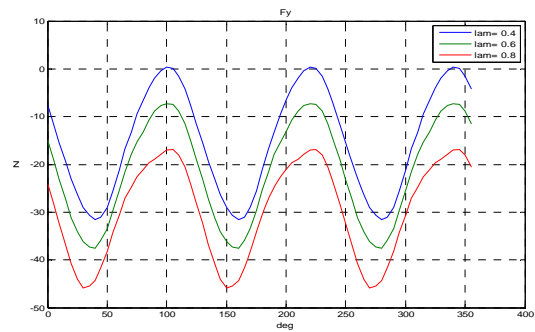
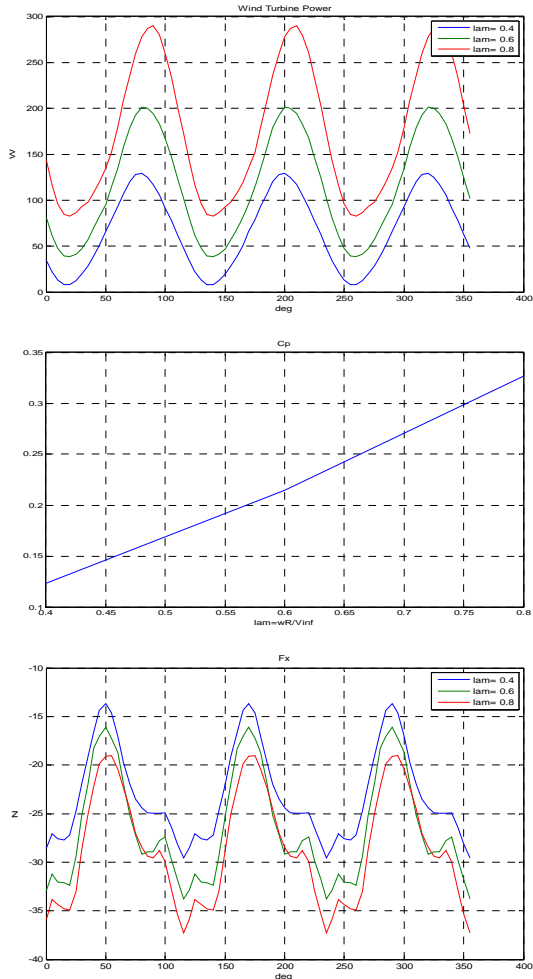
$$F_A(-\Theta_i) = 4a_{d_2}(-\Theta_i)(1 - a_{d_2}(-\Theta_i)) 0,5\rho A_1 (1 - 2a_{d_1})^2 V_\infty^2$$

където $A_i = 2RH \sin(|\Theta_i|) / n$.

Идентификацията на индукционните коефициенти a_{d_1} и a_{d_2} за всяка флуидна тръба се извършва по аналогичен начин на описания в предходния параграф.

На Фиг.8 са показани последователно графиките на $P_{\text{wtr}}(\Theta, \lambda)$, осреднения за едно завъртане на турбината $C_p(\lambda)$, $F_x(\Theta, \lambda)$ и $F_y(\Theta, \lambda)$. Те са получени при моделиране на турбина със следните характеристики:

$R=0,6$ m; $l=0,3$ m; $H=1,2$ m; $\beta=0^0$; $\rho=1,225$ kg/m²; $V_\infty=9$ m/s; $\lambda=0,4; 0,6; 0,8$.



Фиг.8 Числени резултати от моделирането

Благодарност

Авторите изказват благодарност на ФНИ на РБ, за финансирането на разработката по линията на договор ДО-02-348/2008 „Система за мониторинг, диагностика и управление на ветрогенератори”.

Литература

- Beri, H., Y. Yao, (2011), Double Multiple Stream Tube Model and Numerical Analysis of Vertical Axis Wind Turbine, Energy and Power Engineering, 2011, 3, pp. 262-270;
- Hansen M., (2008), Aerodynamics of Wind Turbines 2nd ed., Earthscan in the UK and USA, pp.192;
- Homicz G., (1991), Numerical Simulation of VAWT Stochastic Aerodynamic Loads Produced by Atmospheric Turbulence: VAWT-SAL Code, SANDIA REPORT SAND91-1124 1 UC-261, Sandia National Laboratories, USA, pp.74;
- Ivanell S., (2009) Numerical Computations of Wind Turbine Wakes, Universitetsservice US AB, Stockholm, pp.100;
- Paraschivoiu, I. (1988), Double-Multiple Stream Tube Model for Studying Vertical-Axis Wind Turbines, Journal of Propulsion and Power, Vol. 4, No. 4, p. 370.
- Tong W., (2010), Wind Power Generation and Wind Turbine Design, WIT Press USA, pp.769;

MODELING AND INVESTIGATION OF VERTICAL AXIS WIND TURBINE – TYPE H PART1. MODELING OF AERODYNAMIC

Kalin ADARSKY, Julian GENOV, Konstantin ARNAUDOV
adarsky@yahoo.com, j_genov@mail.bg, askaro@tu-sofia.bg

Dept. of Mechanics
 TU – Sofia, 1756, Bulgaria

This paper presents aerodynamic interaction model of wind turbine with a vertical axis of rotation (VAWT) type H - rotor. Derived dependencies are for wind speed, angle of attack and forces as functions of flow characteristics, angular velocity and the angle of rotation of the turbine. To account for the differences in airflow in the windward and leeward areas caused by aerodynamic interactions between blades the Double Multiple Stream Tube Model (DMST model) is used.