

DEZVOLTAREA MODELULUI AERODINAMIC AL ROTORULUI EOLIAN ELICOIDAL CU AX VERTICAL (REEV)

R. Ciupercă

Universitatea Tehnică a Moldovei

INTRODUCERE

În baza cercetărilor efectuate de echipa Centrului de Elaborare a Sistemelor de Conversie a Energiilor Regenerabile (din care face parte autorul) din cadrul Universității Tehnice a Moldovei (CESCER), au fost propuse mai multe concepte de turbine de vânt. Cu părere de rău unele concepte au rămas doar pe hârtie, altele s-au dovedit a fi ineficiente în rezultatul măsurărilor pe modele. Odată cu dezvoltarea programelor CAD, CAE și majorarea performanțelor tehnicii de calcul, la moment este posibilă analiza și dezvoltarea diferitelor concepte de turbine de vânt cu estimarea performanțelor acestora fără efectuarea parțială a măsurărilor pe modele. Astfel, în lanțul dezvoltării unui produs modern, a fost simplificată etapa cea mai îndelungată și costisitoare. Recent în cadrul CESCER-ului au fost propuse 2 concepte de turbine de vânt cu ax vertical și pale elicoidale [1, 2, 3], unul dintre care este prezentat în fig.1.

Așa cum teoria lui Betz a fost elaborată în general pentru turbinele eoliene cu ax orizontal (HAWT), în conformitate cu lucrările [4, 5, 6] această teorie este aplicabilă și pentru cazul turbinele eoliene cu ax vertical (VAWT). Diferența principală dintre aceste două tipuri de TE constă în apariția fenomenelor nestaționare de curgere. În timpul unei rotații complete a rotorului HAWT, într-un curent de aer uniform, curgerea relativă a unui element de pală este staționară, pe când în cazul VAWT viteza relativă și direcția acesteia variază ciclic. Analiza teoretică a VAWT se limitează la rotoarele cu soliditate scăzută ($\sigma < 1$) în plan bidimensional (rotor infinit de înalt cu diametru finit) [4].

1. METODE DE TIP ELEMENT DE PALĂ - IMPULS

Așa cum teoria discului activ [4] este utilă în general pentru înțelegerea proceselor principale a interacțiunii fluidului cu o turbină eoliană (TE) și a limitărilor funcționale a acestora (Teoria Betz), ea nu permite determinarea formei optime a palei și caracteristicilor de performanță a rotorului eolian. Pentru soluționarea acestor probleme, în a doua

jumătate a secolului trecut, au fost propuse mai multe metode [7] care în linii generale sunt o dezvoltare a teoriei elementului de pală (elaborat în baza teoriei discului activ) și teoriei turbionare pentru mici perturbații.

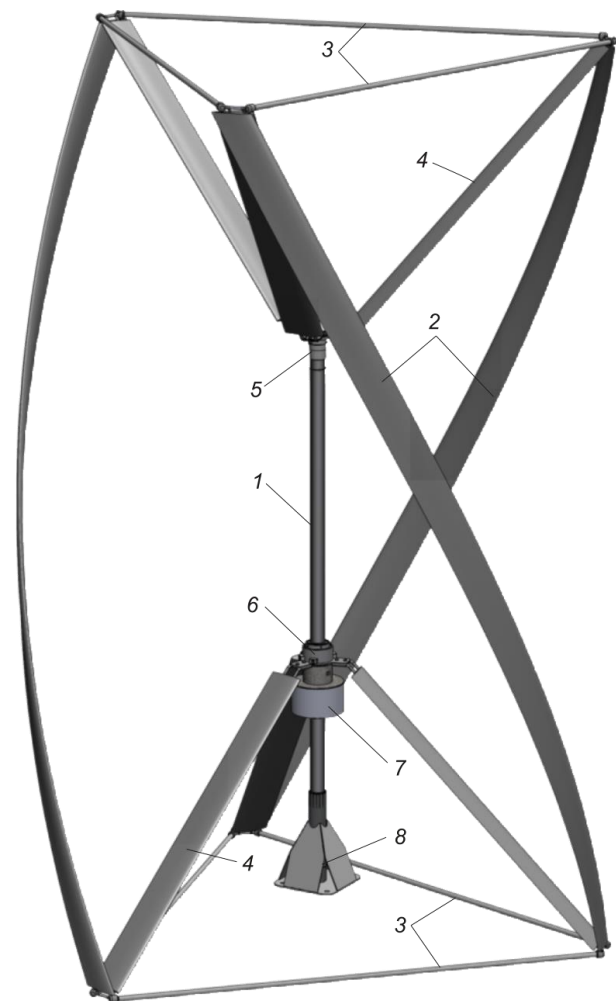


Figura 1. Vederea generală 3D a turbinei de vânt cu ax vertical și pale elicoidale.

1 – arbore central poziționat vertical; 2 – pale cu profil aerodinamic amplasate pe linii elicoidale; 3 – bare de legătură; 4 – pale de rigidizare cu profil aerodinamic; 5 – butucul superior; 6 – butucul inferior; 7 – generator cu magneți permanenți; 8 – element de conexiune.

Modelul unui singur tub de curent, propus pentru prima oară de către Templin în a. 1974 [7] este modelul primar elaborat în baza teoriei elementului de pală ajustat pentru VAWT. Acest model a fost

dezvoltat în două direcții. Prima direcție a fost suplinită de metoda care presupune divizarea unui singur tub de curent în curenți multipli. Această metodă a fost propusă și dezvoltată de către Strickland, a. 1975 [6, 7] fiind denumită ca *modelul tuburilor de curenți multipli*. A doua direcție, care se numește *teoria discului activ dublu* (conceptul lui Lapin [7]), plasează două discuri active în tandem și presupune doi factori de inducție, unul pentru zona din amonte și celălalt pentru zona din avalul rotorului. Aceste două modele prezentate au fost eventual combinate într-un model denumit *modelul tuburilor de curent multiple duble* (DMS) propus și dezvoltat de Paraschivoiu et. al., 1983 [7] (fig. 2). Cu toate că modelul DMS cunoaște o bună convergență cu datele experimentale, posedă un dezavantaj legat de factorii de inducție, care prezintă o valoare stabilită pentru zona din amonte și avalul rotorului și nu pot fi ajustați pentru fiecare tub de curent în parte. Prin urmare, în cadrul teoriei impulsului este imposibil să se calculeze riguros variația vitezei induse în lungul curgerii [4].

Depășirea acestei probleme poate fi soluționată prin abordarea *modelului DMS cu factori de inducție variabili* (DMSV), constituind o dezvoltare a modelului DMS (fig. 2).

O altă modalitate de determinarea a vitezelor induse ar fi cu ajutorul vorticității difuzată în dără, utilizată preliminar la calcul elicei propulsive.

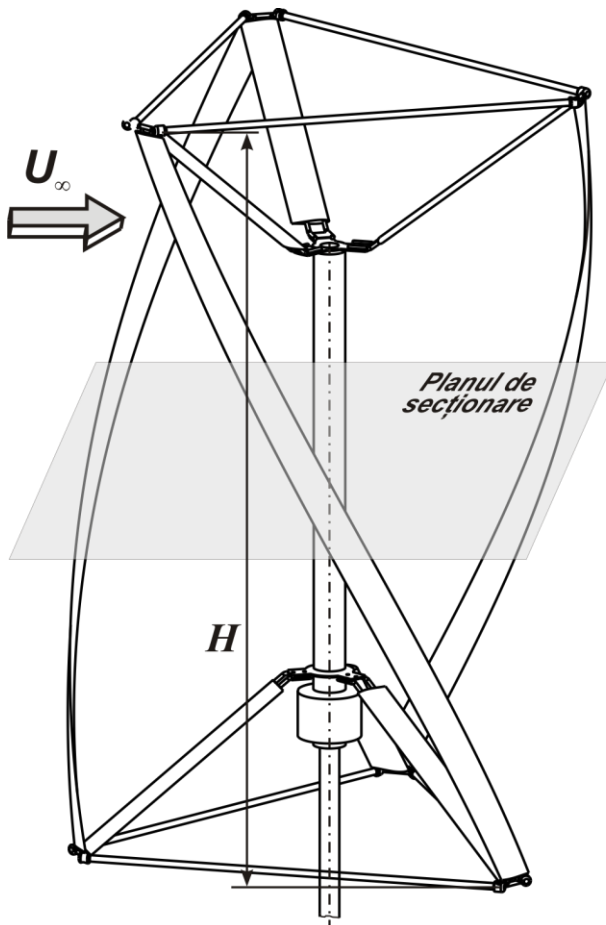


Figura 3. Geometria REEV.

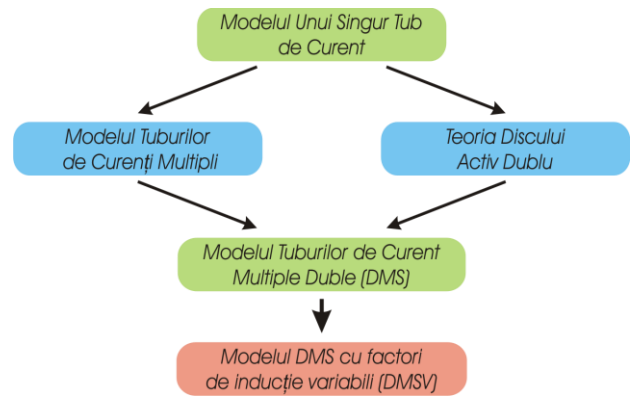
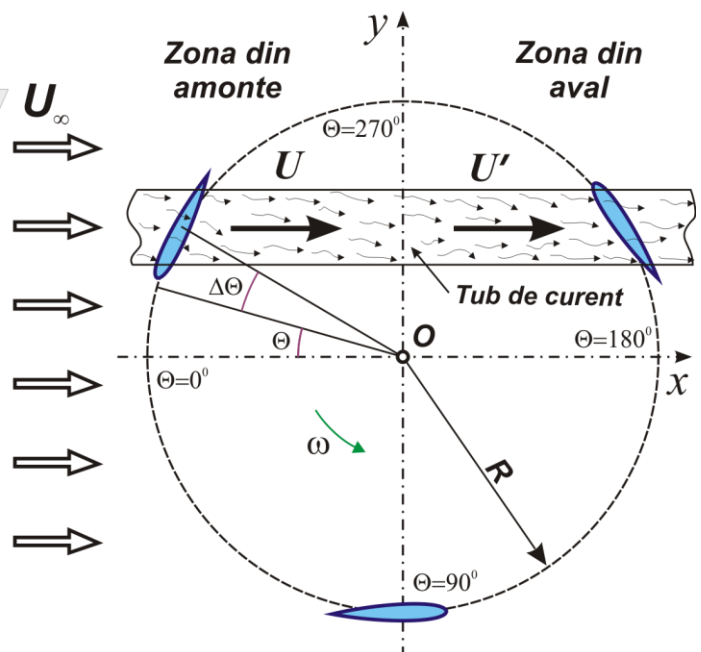


Figura 2. Metode de tip element de pală - impuls.

Astfel metoda de tip dără cu vârtejuri este caracterizată combinarea mișcării de rotație cu mișcarea de transport din aval, care conduce la formarea unei pânze de vârtejuri cu intensitate variabilă de formă cicloidală. Pentru cazul VAWT această metodă este încă relativ crudă deoarece determinarea exactă a vitezelor induse depinde de un număr mare de parametri, iar forma corespunzătoare a pânzelor de vârtejuri constituie o problemă destul de complexă.

2. MODELUL TUBURILOR DE CURENT MULTIPLE DUBLE

În rezultatul analizei modelelor de predicție a performanței VAWT, în baza elaborării modelului matematic al REEV a fost acceptat modelul DMS propus de Paraschivoiu [7]. În fig. 3 este prezentată geometria REEV și secțiunea transversală a acestuia cu aplicarea unui tub de curent elementar folosit în teoria tuburilor de curent multiple.



Zona tubului de curent elementar a fluxului de aer, care baleiază rotorul în plan orizontal, este divizată în tuburi de curent multipli, distribuiți uniform pe direcția vântului la un unghi $\Delta\Theta$ față de axa x :

$$\Delta\Theta = \frac{2\pi}{m} \quad (1)$$

unde m este numărul de tuburi de curent multipli.

3. VITEZE INDUSE

Modelul DMS presupune un sistem de tuburi de curent multiple divizate în două părți. Curgerea în fiecare tub de curent se presupune acționată de două discuri active în tandem (fig. 4): primul disc reprezentând jumătatea din amonte a suprafeței descrise de palele rotorului ($-\pi/2 \leq \Theta \leq \pi/2$) și discul doi care înlocuiește jumătatea din aval a rotorului ($\pi/2 \leq \Theta \leq 3\pi/2$).

Determinarea vitezelor induse, care străbat rotorul eolian, constituie o fază importantă la abordarea teoriei discului activ dublu în tandem cu varierea acestora pe înălțimea rotorului. Având în vedere că REEV face parte din categoria TE de putere mică, varierea gradientul vitezei funcție de înălțime nu va fi luată în considerație. Viteza de la infinit amonte U_∞ , care traversează fiecare tub de curent, va scădea în direcție axială ca urmare a rezistenței opuse de discuri. Astfel, de-a lungul oricărui tub de curent, fluidul capătă patru viteze diferite (fig. 4):

$$\begin{aligned} U &= (1-a) \cdot U_\infty; \\ U_e &= (1-2a) \cdot U_\infty; \\ U' &= (1-a') \cdot U_e = (1-a') \cdot (1-2a) \cdot U_\infty; \\ U'_e &= (1-2a') \cdot U_e = (1-2a') \cdot (1-2a) \cdot U_\infty. \end{aligned} \quad (2)$$

4. JUMĂTATEA DIN AMONTE A ROTORULUI

În baza coeficienților aerodinamici cunoscuți (având în vedere că profilul aerodinamic a fost ales preliminar) și schema de calcul prezentată în fig. 5, forțele aerodinamice de portanță și rezistență în zona din amonte, $-\pi/2 \leq \Theta \leq \pi/2$ se determină din relațiile:

$$\begin{aligned} F_L &= C_L \cdot (0,5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot U_{rel}^2); \\ F_D &= C_D \cdot (0,5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot U_{rel}^2), \end{aligned} \quad (3)$$

unde U_{rel} este viteza locală relativă a fluxului;

$A_p = ch$ – aria suprafeței laterale a palei (c

– lungimea corzii, h – înălțimea palei);

C_L și C_D – coeficienții aerodinamici adimensionali, numiți coeficientul de portanță (lift) și coeficientul de rezistență (drag).

Coeficienții aerodinamici C_L și C_D sunt funcții de unghiul de atac α , numărul Reynolds Re și forma aerodinamică a profilului palei.

Componentele forței aerodinamice în sistemul de coordonate $O'x_i y_n$ sunt (fig. 5):

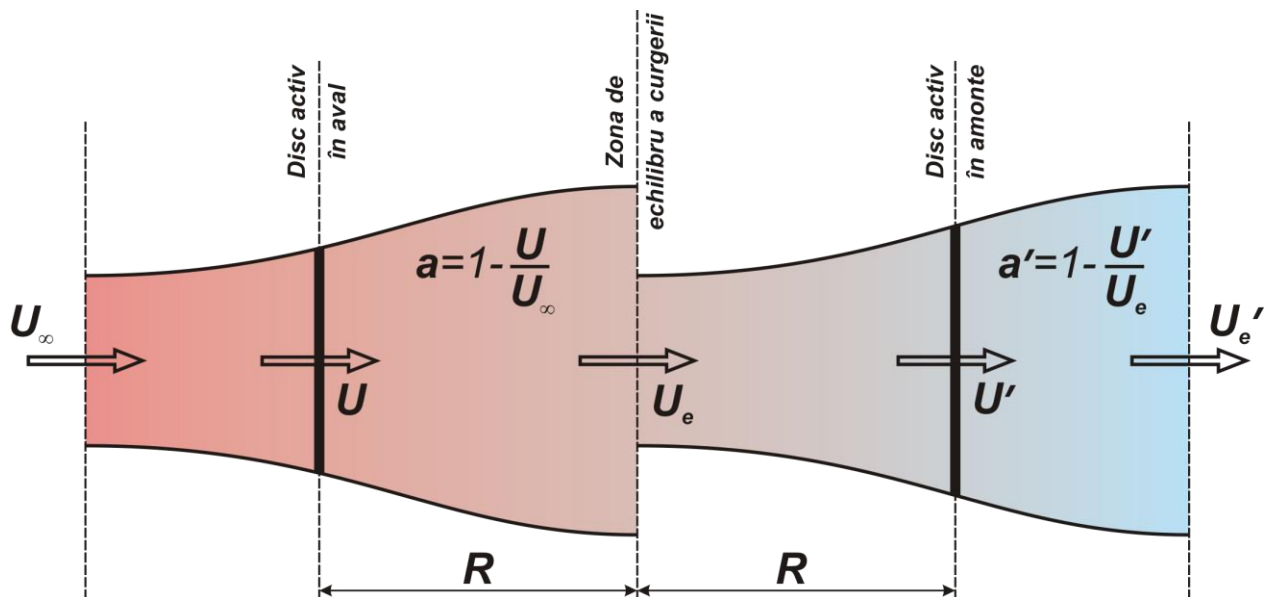


Figura 4. Modelul discurilor active în tandem.

$$\begin{aligned} F_N &= -C_N \cdot (0,5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot U_{rel}^2); \\ F_T &= C_T \cdot (0,5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot U_{rel}^2), \end{aligned} \quad (4)$$

unde,

$$\begin{aligned} C_N &= C_L \cdot \cos \alpha + C_D \cdot \sin \alpha; \\ C_T &= C_L \cdot \sin \alpha - C_D \cdot \cos \alpha. \end{aligned} \quad (5)$$

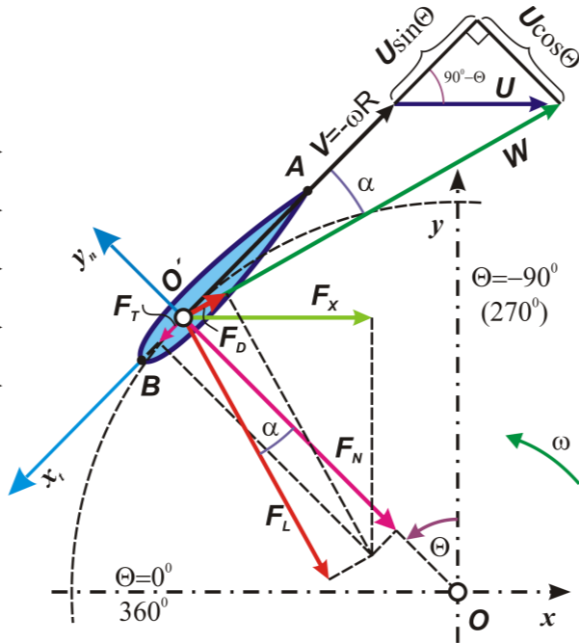


Figura 5. Zona rotorului în amonte.

Viteza relativă la elementul de pală W pentru zona dată se determină în conformitate cu schema de calcul prezentată în fig. 5 și relațiile 2:

$$\begin{aligned} W &= \sqrt{(U + U \cdot \sin \Theta)^2 + (U \cdot \cos \Theta)^2} = \\ &= U_{\infty} \sqrt{[\lambda + (1-a) \cdot \sin \Theta]^2 + [(1-a) \cdot \cos \Theta]^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Dacă coarda elementului de pală este perpendiculară pe rază, atunci unghiul de incidență local al elementului de pală se poate determina din relația:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{(1-a) \cdot \cos \Theta}{\lambda + (1-a) \cdot \sin \Theta} \right). \quad (7)$$

Forța pe tubul de curent elementar în direcția mișcării fluxului de aer F_x , la fel ca și componentele normală și tangențială (relația 4), pot fi determinate pentru fiecare tub de curent în parte în dependență de poziția palei în raport cu unghiul Θ .

$$\begin{aligned} F_x(\Theta) &= F_N \cdot \sin \Theta - F_T \cdot \cos \Theta = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_p \cdot W^2 \cdot (C_N \cdot \sin \Theta - C_T \cdot \cos \Theta). \end{aligned} \quad (8)$$

Forma adimensională a componentelor normale F_N și tangențiale F_T se obține în felul următor:

$$\begin{aligned} C_{F_N} &= \frac{F_N}{0,5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot U_{\infty}^2} = C_N \left(\frac{W}{U_{\infty}} \right)^2; \\ C_{F_T} &= \frac{F_T}{0,5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot U_{\infty}^2} = C_T \left(\frac{W}{U_{\infty}} \right)^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Forța medie generată de $\frac{1}{2}$ din palele N_{pal} ale rotorului, necesară pentru determinarea momentului de torsiune dezvoltat în zona din amonte, poate fi determinată cu ajutorul teoriei elementului de pală, și anume:

$$F_x = \frac{N_{pal}}{2} \cdot \frac{\Delta \Theta}{\pi} \cdot F_x(\Theta). \quad (10)$$

Similar se determină și forma adimensională a forței pe tubul de curent elementar F_x combinând relațiile 4 și 8 și 9:

$$C_{F_x} = \frac{\sigma}{2\pi} \cdot \left(\frac{W}{U_{\infty}} \right)^2 \cdot (C_N - C_T \cdot \tan^{-1} \Theta). \quad (11)$$

Momentul de torsiune generat de palele din amonte se determină pentru fiecare element în parte în dependență de poziția acestora în raport cu unghiul Θ .

$$Q_{am}(\Theta) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_p \cdot W^2 \cdot C_T \cdot R. \quad (12)$$

Astfel, valoarea medie a momentului de torsiune generat de $\frac{1}{2}$ din palele N_{pal} ale rotorului, la traversarea zonei din amonte, se determină astfel:

$$Q_{am} = \frac{N_{pal}}{2\pi} \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Q_{am}(\Theta) d\Theta, \quad (13)$$

iar coeficientul momentului de torsiune pentru zona respectivă:

$$C_{Q_{am}} = \frac{\sigma}{4\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} C_T \cdot \left(\frac{W}{U_{\infty}} \right)^2 d\Theta. \quad (14)$$

Astfel pentru jumătatea din amonte a rotorului avem următoarea relație pentru determinarea coeficientului de putere:

$$C_{P_{am}} = \lambda \cdot C_{Q_{am}}. \quad (15)$$

5. JUMĂTATEA DIN AVAL A ROTORULUI

Pentru a doua jumătate a rotorului în direcția curgerii fluxului de aer $\pi/2 \leq \Theta \leq 3\pi/2$ componentele forței aerodinamice în sistemul de coordonate $O'x_t y_n$ sunt (fig. 6):

$$\begin{aligned} F'_N &= C'_N \cdot (0,5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot U_{rel}^2); \\ F'_T &= C'_T \cdot (0,5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot U_{rel}^2), \end{aligned} \quad (16)$$

de unde,

$$\begin{aligned} C'_N &= C_L \cdot \cos \alpha' + C_D \cdot \sin \alpha'; \\ C'_T &= C_L \cdot \sin \alpha' - C_D \cdot \cos \alpha'. \end{aligned} \quad (18)$$

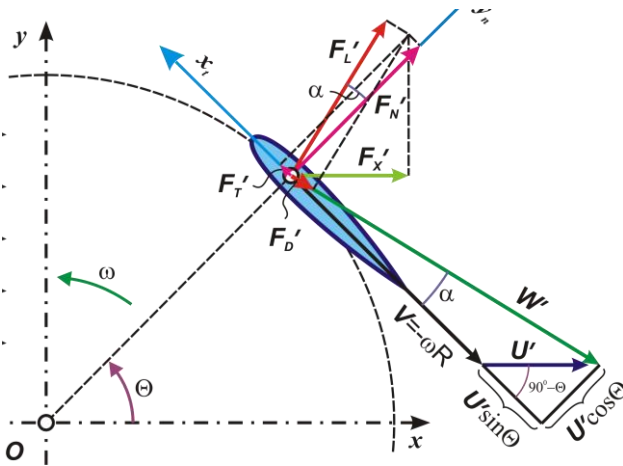


Figura 6. Zona rotorului în aval.

Viteza locală relativă a fluxului de aer W' pentru zona dată se determină în conformitate cu schema de calcul prezentată în fig. 6 și relațiile 2:

$$\begin{aligned} W' &= \sqrt{(V + U' \cdot \sin \Theta)^2 + (U' \cdot \cos \Theta)^2} = \\ &= U_e \sqrt{[\lambda' + (1 - a') \cdot \sin \Theta]^2 + [(1 - a') \cdot \cos \Theta]^2}, \end{aligned} \quad (19)$$

unde $\lambda' = R \cdot \omega / U'$, este raportul vitezelor la vârful palei pentru zona dată a rotorului.

Unghiul de incidență al elementului de pală α' se poate determina în conformitate cu fig. 6 din relația:

$$\alpha' = \tan^{-1} \left(\frac{(1 - a') \cdot \cos \Theta}{\lambda' + (1 - a') \cdot \sin \Theta} \right). \quad (20)$$

Pentru zona rotorului în aval forța pe tubul de curent elementar în direcția mișcării fluxului de aer

F'_X pentru fiecare pală în raport cu unghiul de azimut Θ este:

$$F'_X = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_p \cdot W'^2 \cdot (C'_N \cdot \cos \Theta - C'_T \cdot \sin \Theta). \quad (21)$$

Forma adimensională a componentelor normale F'_N și tangențiale F'_T se obține în felul următor:

$$\begin{aligned} C'_{F_N} &= \frac{F'_N}{0,5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot U_\infty^2} = C'_N \left(\frac{W'}{U_\infty} \right)^2; \\ C'_{F_T} &= \frac{F'_T}{0,5 \cdot \rho \cdot A_p \cdot U_\infty^2} = C'_T \left(\frac{W'}{U_\infty} \right)^2, \end{aligned} \quad (22)$$

Forța medie generată de palele N_{pal} a rotorului din jumătatea din aval:

$$F'_X = \frac{N_{pal}}{2} \cdot \frac{\Delta \Theta}{\pi} \cdot F'_X(\Theta), \quad (23)$$

iar forma adimensională a forței F'_X combinând relațiile 16 și 21 și 22:

$$C'_{F_X} = \frac{\sigma}{2\pi} \cdot \left(\frac{W'}{U_\infty} \right)^2 \cdot (C'_N \cdot \tan^{-1} \Theta - C'_T). \quad (24)$$

Momentul de torsiune generat de palele din aval, în dependență de poziția acestora în raport cu unghiul Θ , se determină pentru fiecare element în parte:

$$Q_{av}(\Theta) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_p \cdot W'^2 \cdot C'_T \cdot R. \quad (25)$$

Valoarea medie a momentului de torsiune în zona din aval a rotorului se determină din relația:

$$Q_{av} = \frac{N_{pal}}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{\pi/2}^{3\pi/2} Q_{av}(\Theta) d\Theta, \quad (26)$$

iar coeficientul momentului de torsiune pentru zona respectivă:

$$C_{Q_{av}} = \frac{\sigma}{4\pi} \int_{\pi/2}^{3\pi/2} C'_T \cdot \left(\frac{W'}{U_\infty} \right)^2 d\Theta. \quad (27)$$

Ca și în cazul zonei din amonte pentru jumătatea din aval a rotorului avem următoarea relație pentru determinarea coeficientului de putere:

$$C_{P_{av}} = \lambda \cdot C_{Q_{av}}. \quad (28)$$

Astfel, în final, coeficientul de putere pentru tot ciclul de operare al rotorului este constituit din suma coeficienților de putere din zona rotorului din amonte și aval:

$$C_p = C_{P_{am}} + C_{P_{av}}. \quad (29)$$

CONCLUZII

Volumul mare de calcule, în vederea optimizării parametrilor funcționali ai REEV, necesită elaborarea unui algoritm format dintr-un ciclu de iterații pentru corectarea în trepte a geometriei rotorului eolian pe baza curbelor caracteristice. În acest sens în cadrul centrului CESCER sub îndrumarea conf. univ. Viorel Bostan, în baza metodologiei de calcul aerodinamic a VAWT elaborată în lucrarea dată, se lucrează asupra unui program de calcul numeric pentru optimizare. Acest program numeric, scris în mediul Matlab, v-a permite determinarea forțelor aerodinamice generate de palele rotorului în mișcare și performanța turbinei pentru diferiți parametri de intrare. Astfel datele de intrare, necesare pentru calcul, reprezintă parametrii geometrici ai rotorului:

- ⇒ numărul de pale, N_{pal} ;
 - ⇒ secțiunea transversală a palei (în general, profil aerodinamic simetric din familia NACA);
 - ⇒ raza rotorului, R ;
 - ⇒ înălțimea rotorului, H ;
 - ⇒ raportul de soliditate al rotorului, σ ;
 - ⇒ viteza de la infinit amonte $U\infty$;
 - ⇒ raportul vitezelor la vârful palelor, λ ;
- Programul de calcul v-a determina forțele aerodinamice pentru diferite regimuri de exploatare. Tabloul forțelor odată determinat permite următoarele aplicații practice:
- ⇒ calculul curbelor caracteristice;
 - ⇒ calculul curbelor adimensionale ale tipului de turbină;
 - ⇒ calculul curbelor pentru o turbină asemenea în diferite condiții de exploatare;

Bibliografie

1. Bostan, I., Vișa, I., Dulgheru, V., Ciupercă, R. Turbină de vânt cu ax vertical / Solicitant Universitatea Tehnică a Moldovei și Universitatea „Transilvania” din Brașov. Hotărâre pozitivă nr. 5849 de acordare a brevetului de invenție, Republica Moldova, Int. Cl. F 03 D3/00.– nr. depoz. a 2007 0134; data depoz. 11.05.2007 – www.agepi.md

2. Bostan, I., Vișa, I., Dulgheru, V., Ciupercă, R.; Turbină de vânt cu ax vertical combinată (variante) / Solicitant Universitatea Tehnică a Moldovei și Universitatea „Transilvania” din Brașov. Hotărâre pozitivă nr. 5771 de acordare a brevetului de invenție, Republica Moldova, Int. Cl. F 03 D3/00.– nr. depoz. a 2007 0133; data depoz. 11.05.2007 – www.agepi.md

3. Bostan, I., Toca A., Dulgheru, V., Ciupercă, R. Contribution to the developing of pintle wind turbines with helical blades. The 32st Internationally attended Scientific Conference „Modern Tehnologies in the XXI Century”, Bucharest 01-02 novem. 2007. ISBN 973-973-640-127-5.

4. Dumitrescu, H., Cardoso, V., Dumitrache, Al. Aerodinamica Turbinelor de vânt. Editura Academiei Române, București, 2001. – 320 p. – ISBN 973-27-0849-2.

5. Manwell, J.F., McGowan, J.F., Rogers, A.L. Wind Energz Explained – Theorz, Disign and Aplication : John Wiley & Sons Ltd., 2002. – 590 p. – ISBN 0-470-84612-7.

6. Strickland, J.H. The Darrieus Turbine: A Performance Prediction Model Using Multiple Streamtubes / Sandia National Laboratories; SANDIA Report, SAND75-0431, 1975. – 38 p.

7. Paraschivoiu, I. Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept. – Quebec : Polytechnic International Press, 2002. – 590 p. – ISBN 2-553-00931-3.