

Sławomir Adam SORKO

Tomasz Janusz TELESZEWSKI

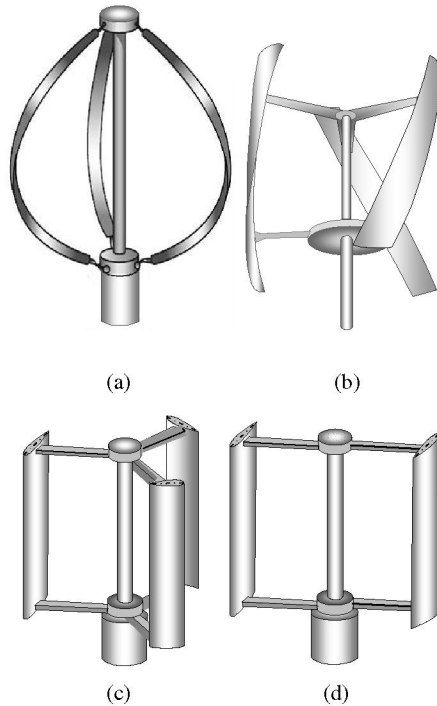
Politechnika Białostocka, WBiIŚ, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok

E-mail: s.sorko@pb.edu.pl, t.teleszewski@pb.edu.pl

Modelowanie parametrów aerodynamicznych urządzeń energetyki wiatrowej III. Analiza aerodynamiczna rotorów wiatrowych o pionowej osi obrotu

1 Wprowadzenie

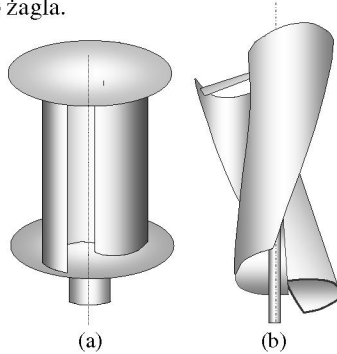
Rotory osiowe - turbiny o pionowej osi obrotu (*Vertical Axis Wind Turbine*) (rys. 1) dzielą się ze względu na budowę wirnika na dwie zasadnicze grupy z licznymi odmianami w ukształtowaniu elementów rotora. Pierwszą grupę stanowią rotory konstrukcji Darrieusa, których wirniki składają się z profilowanych łopat o krzywoliniowych, łukowych lub helikoidalnych płatach (rys. 1a, 1b) lub łopat o kształcie płatów prostoliniowych ułożonych wzdłuż osi obrotu rotora (rys. 1c, 1d).



*Rys. 1. Rotory wiatrowe typu Darrieusa
(a), (b) rotory o łukowych
i helikoidalnych płatach;
(c), (d) rotory o płatach prostych*

*Fig. 1. Wind turbines Darrieus type
(a), (b) rotors with arc and helical blades
(c), (d) rotors with straight blades*

Drugą, konstrukcyjnie odmienną grupą są rotory typu Savoniusa (rys. 2), których wirniki są złożone z dwóch lub kilku jednopowłokowych elementów w formie podobnej do zagła.



*Rys.2. Rotory wiatrowe typu Savoniusa
(a) rotor o cylindrycznych elementach wirnika;
(b) rotor o helikoidalnych elementach wirnika*

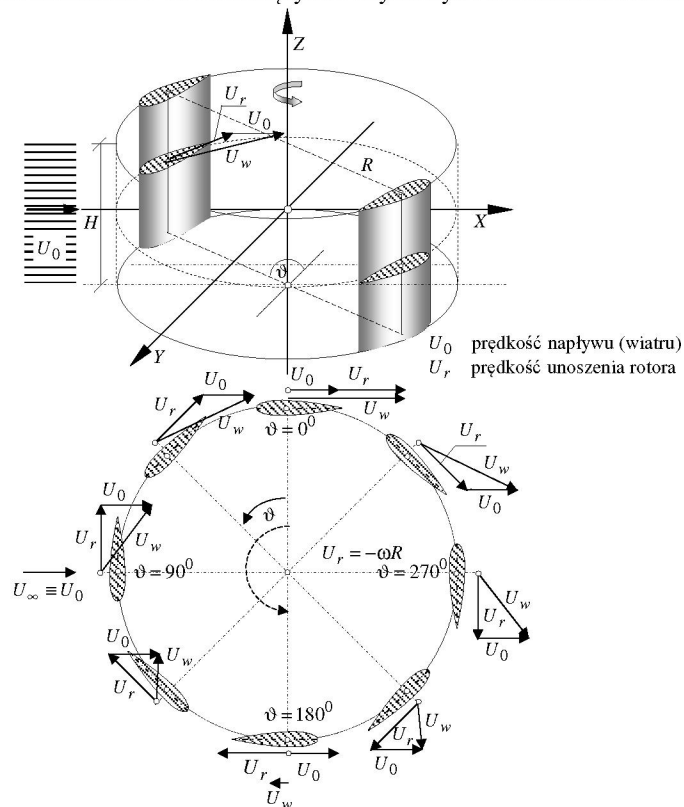
*Fig.2. Wind turbines Savonius type
(a) rotor with cylindrical elements
(b) rotor with twisted elements*

Rotory typu Darrieusa są maszynami rotodynamicznymi, w których profilowane łopaty opływane strumieniem powietrza generują siłę nośną, w odróżnieniu od rotorów Savoniusa, w których generowane są niezrównoważone siły parcia na powierzchni elementów rotora. W obydwu rodzajach maszyn wiatrowych moment obrotowy wirnika jest iloczynem działania odpowiednio siły nośnej lub siły parcia na niezerowym ramieniu wynikającym z osadzenia elementów generujących energię w wyniku przejmowania jej od strumienia opływającego czynnika.

W podstawowym rozwiązaniu konstrukcyjnym rotory Darrieusa stanowią układ dwóch lub więcej profilowanych łopat o łukowym ukształtowaniu płata (krzywa łańcuchowa) mocowanego u podstawy i nasady do osi wirnika (rys. 1a). Rozwinięciem tej koncepcji są rotory z płacami o prostoliniowej lub wygiętej krawędzi natarcia płata ułożonej na powierzchni śrubowej lub helikoidalnej (rys. 1b). Odmienną formą konstrukcyjną, nawiązującą do konstrukcji palisady wirnikowej złożonej z płatów prostokątnych, są wirniki o profilowanych płacach i prostoliniowych krawędziach natarcia płatów równoległych do osi wirnika (rys. 1c, d), (dwuelementowe rotory typu H i pokrewne wieloelementowe). W rozwojowych rozwiązaniach konstrukcyjnych tego typu rotorów są stosowane systemy obrotu łopat wokół osi (oś centrów profili), umożliwiające uzyskanie optymalnych kątów natarcia na płaty palisady rotora w ich ruchu okrężnym względem osi wirnika i napływającego strumienia powietrza generującego ruch rotora. Istotną zaletą rotorów wiatrowych Darrieusa jest fakt, że prędkość unoszenia płatów rotora jest znacząco większa od prędkości strumienia wiatru wywołującego ruch wirnika, co zapewnia w ramach stosowanych rozwiązań geometrycznych rotorów generację kątów natarcia $-20^{\circ} \leq \alpha \leq +20^{\circ}$, zapewniających laminarny opływ większości profili stosowanych w konstrukcjach rotorów. Skutkiem tego jest wysoka sprawność aerodynamiczna tego typu układów, określana formułą Betza na 59%, kiedy odzysk energii strumienia wiatru w rotorach Savoniusa szacuje się według tej samej teorii na 16% [1]. Dodatkowym atutem obydwu rozwiązań konstrukcyjnych, tj. rotorów w typie Darrieusa i rotorów typu Savoniusa, jest to, że ich działanie nie jest zależne od kierunku opływającego je strumienia powietrza, w odróżnieniu od turbin o poziomej osi śmigłowego wirnika, które wymagają pozycjonowania względem kierunku wiatru.

Rotory wiatrowe typu Darrieusa są obiektem szczególnego zainteresowania w kategorii maszyn techniki wiatrowej o małej mocy, w porównaniu do zaawansowanych wiatrowych turbin śmigłowych, z uwagi na szerokie możliwości ich adaptacji i posadowienia jako niewielkich urządzeń w obszarach zurbanizowanych [2].

Parametry użytkowe rotorów wiatrowych o pionowej osi obrotu wirnika można oszacować prostymi metodami, polegającymi na bilansie energii przekazywanej przez strumień wiatru działający w płaszczyźnie wirnika, bez wyznaczania przepływu generowanego ruchem wirnika (*actuator disc method*) [3]. Zaawansowane, a przy tym bardziej dokładne metody obliczeniowe polegają na aerodynamicznej analizie ruchu płata rotora w poszczególnych fazach ruchu i wyznaczenia pól prędkości i ciśnienia opływu płata, a następnie współczynników aerodynamicznych płata (lub profilu w analizie zagadnienia jako przepływu płaskiego) i określenia na tej podstawie sił działających na płat i momentów sił stanowiących o użytkowych własnościach rotora.



Rys. 3. Rotor H typu Darrieusa. Parametry geometryczne. Prędkości napływu w fazach ruchu okrężnego łopaty wirnika

Fig.3. H- rotor Darrieus type. Rotor view and basic geometry. Relative velocities on the moving phase defined by angle between the wind stream direction and chord of the profile

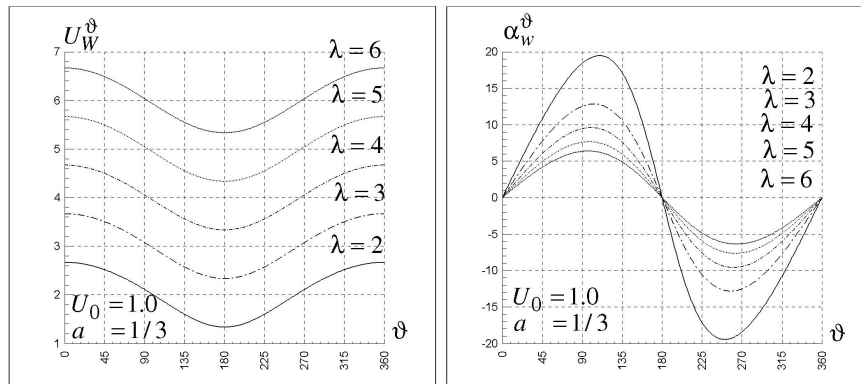
2 Model przepływu przez wieniec łopatkowy rotora wiatrowego

Przyjmując liniową zależność prędkości przepływu przez wirnik od prędkości wiatru $U_w = (1-a)U_0$, $0 < a < 1$ i współczynnik szybkobieżności rotora wiatrowego $\lambda = \omega R/U_0$, prędkość wypadkową napływu na łopatkę rotora U_w^ϑ i kąt natarcia α_w^ϑ , określony jako kąt pomiędzy kierunkiem prędkości strumienia opływającego łopatkę i cięciwą profilu łopaty ustawionej tak, że krawędzie natarcia i spływu profilu leżą na okręgu o promieniu R wirnika (rys. 3), można opisać zależnościami:

$$U_w^\vartheta = U_0 \sqrt{((1-a)\sin\vartheta)^2 + ((1-a)\cos\vartheta + \lambda)^2}, \quad (1)$$

$$\alpha_w^\vartheta = \arctan\left(\frac{(1-a)\sin\vartheta}{(1-a)\cos\vartheta + \lambda}\right). \quad (2)$$

Wartości prędkości względnej napływu na łopatkę wirnika i wartości kąta natarcia strumienia w zakresie kątów $0^\circ \leq \vartheta \leq 360^\circ$ dla wybranych całkowitych wartości współczynnika szybkobieżności λ przedstawiono na rysunkach 4a i 4b.



Rys.4. Rozkład prędkości względnej (a); Wartości kąta natarcia napływu strumienia (b)
Fig.4. Relative velocity of inflow on blade (a); Attack angle of relative inflow on blade (b)

Wyznaczenie prędkości względnej opływu łopaty rotora $\mathbf{U}_w^\vartheta = \mathbf{U}_0 - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$ i kąta natarcia opływu względnego $\alpha_w^\vartheta \equiv \angle(\mathbf{U}_w^\vartheta, c)$, tj. kąta pomiędzy kierunkiem strumienia i cięciwą profilu łopaty, w poszczególnych położeniach w trakcie pełnego obrotu łopaty wokół osi wirnika umożliwia dalszą analizę opływu płata i wyznaczenia charakterystyk aerodynamicznych łopaty metodami klasycznych teorii aerodynamicznych.

Przyjmując, że przepływ przez wirnik o niewielkim wypełnieniu palisady wirnikowej (wirniki dwu lub trójłopatowe) jest przepływem potencjalnym płynu doskonałego, co przy niewielkich prędkościach opływu ma uzasadnienie [4], z wyjątkiem warstwy

wirowej na powierzchniach opływanych elementów, zagadnienie opływu palisady wirnikowej można sprowadzić do zagadnienia opływu płata nośnego.

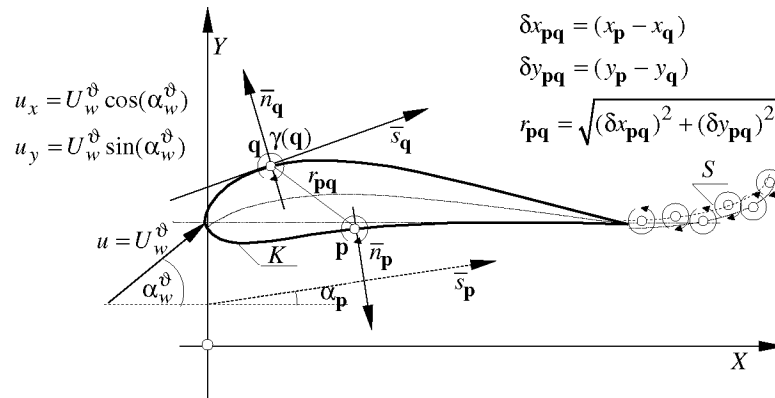
W przypadku rotorów o znacznym wydłużeniu łopat i prostoliniowej lub łukowej krawędzi natarcia ułożonych na powierzchni walcowej lub helikoidalnej przepływ można w uproszczeniu traktować jako układ przepływów płaskich na płaszczyznach prostopadłych do osi wirnika, co sprowadza zagadnienie opływu palisady wirnikowej do zagadnienia analizy cyrkulacyjnego opływu profilu.

2.1 Matematyczny opis cyrkulacyjnego opływu profilu

Pole prędkości opływu profilu można traktować jako sumę przepływu jednorodnego strumienia płynu \mathbf{u}_∞ , przepływu generującego cyrkulację \mathbf{u}_Γ i przepływu wzbudzonego \mathbf{u}_p przez profil w przepływie jednorodnym ($\mathbf{u} = \mathbf{u}_\infty + \mathbf{u}_\Gamma + \mathbf{u}_p$), zatem potencjał prędkości (Φ) opływu profilu można traktować jako sumę potencjału przepływu jednorodnego ϕ_∞ i potencjału prędkości wzbudzonej przez profil $\phi_{\Gamma+p}$ z warunkiem brzegowym $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}_{prof} \equiv u_n = \partial\phi/\partial n = 0$ na linii brzegowej opływającego profilu.

W teorii profilu zagadnienie cyrkulacyjnego opływu rozwiązuje się alternatywnymi metodami: metodą konforemnego odwzorowania profilu na okrąg [5], [6] lub metodą brzegowych równań całkowych [7], w tym mającą swoje hydrodynamiczne uzasadnienie metodą hydrodynamicznych osobliwości [8].

Niżej przedstawiono matematyczny opis cyrkulacyjnego opływu profilu przy użyciu hydrodynamicznych osobliwości, w którym profil i ślad wirowy za opływającym profilem są modelowane przez rozkłady wirowości. W ramach tego modelu potencjalny płaski cyrkulacyjny opływ profilu opisuje równanie całkowe:



Rys.5. Płaski opływ profilu. Model rozkładu hydrodynamicznych osobliwości – wirów na konturze profilu i śladzie wirowym

Fig.5. Potential two-dimensional flow past an airfoil. Model of the singularities - vortex on the contour and the aerodynamic wake

$$-\frac{1}{2}\gamma(\mathbf{p}) + \int_{(K)} \gamma(\mathbf{q}) H(\mathbf{p}, \mathbf{q}) dl_q - u_x \cos(\alpha_p) + u_y \sin(\alpha_p) + \int_{(S)} \gamma(\mathbf{w}) H(\mathbf{p}, \mathbf{w}) dl_w = 0, \quad (3)$$

gdzie $\mathbf{q} = \mathbf{q}(x_{\mathbf{q}}, y_{\mathbf{q}}) \in (K)$ i $\mathbf{p} = \mathbf{p}(x_{\mathbf{p}}, y_{\mathbf{p}}) \in (K)$ są odpowiednio punktem źródłowym i punktem ustalonym na konturze K (rys. 5), natomiast $\mathbf{w} = \mathbf{w}(x_{\mathbf{w}}, y_{\mathbf{w}}) \in (S)$ jest punktem linii wirowej śladu aerodynamicznego (S) , w którym gęstości wirowości $\gamma(\mathbf{w})$ są znane. Jądro całkowe w równaniu (3) $H(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ jest funkcją Neumanna, będącą normalną pochodną rozwiązania podstawowego równania Laplace'a opisanego funkcją Greena w obszarze nieskończonym:

$$G(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \frac{1}{2\pi} \ln r_{\mathbf{p}\mathbf{q}}, \quad H(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \frac{\partial G(\mathbf{p}, \mathbf{q})}{\partial \bar{n}_{\mathbf{p}}} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\delta x_{\mathbf{p}\mathbf{q}} \sin(\alpha_{\mathbf{p}}) - \delta y_{\mathbf{p}\mathbf{q}} \cos(\alpha_{\mathbf{p}})}{r_{\mathbf{p}\mathbf{q}}^2} \right). \quad (3^*)$$

Metodom obliczeniowym wyznaczania wirowości w śladzie aerodynamicznym poświęcona jest obszerna literatura [6], [9]. Jednym z możliwych uproszczeń rozwiązania równania całkowego jest dekompozycja gęstości wirowości na konturze $\gamma(\mathbf{q}) = \bar{\gamma}(\mathbf{q}) + \tilde{\gamma}(\mathbf{q})$ na część $\bar{\gamma}(\mathbf{q})$ spełniającą równanie całkowe bezcyrkulacyjnego opływu profilu:

$$-\frac{1}{2} \bar{\gamma}(\mathbf{p}) + \int_{(K)} \bar{\gamma}(\mathbf{q}) H(\mathbf{p}, \mathbf{q}) dl_{\mathbf{q}} - u_x \cos(\alpha_{\mathbf{p}}) + u_y \sin(\alpha_{\mathbf{p}}) = 0 \quad (3a)$$

oraz część $\tilde{\gamma}(\mathbf{q})$ spełniającą równanie:

$$-\frac{1}{2} \tilde{\gamma}(\mathbf{p}) + \int_{(K)} \tilde{\gamma}(\mathbf{q}) H(\mathbf{p}, \mathbf{q}) dl_{\mathbf{q}} + \sum_{w=1}^W \Gamma(\mathbf{w}) \left[\frac{\delta x_{\mathbf{w}\mathbf{q}} \cos(\alpha_{\mathbf{p}}) + \delta y_{\mathbf{w}\mathbf{q}} \sin(\alpha_{\mathbf{p}})}{r_{\mathbf{w}\mathbf{q}}^2} \right] + \Gamma_{erc} = 0, \quad (3b)$$

gdzie $\Gamma(\mathbf{w})$ jest gęstością izolowanych punktowych wirów modelujących ślad wirowy, natomiast Γ_{erc} jest cyrkulacją opływu profilu. Istnieje wiele metod wyznaczania śladu wirowego i jego ewolucji w ramach modelowania cyrkulacyjnych opływów profili, układów profili i palisad profili [6, 10, 11], których szczegółowa analiza nie jest przedmiotem opracowania. Ostatecznie rozkład gęstości wirowości na profilu winien spełniać równość:

$$\int_{(K)} \gamma(\mathbf{q}) dl_{\mathbf{q}} + \sum_{w=1}^W \Gamma_w - \Gamma_{erc} = 0. \quad (4)$$

Prędkość styczna do profilu $u_s(\mathbf{p})$ i składowe $u_x(\mathbf{p}), u_y(\mathbf{p})$ w punktach $\mathbf{p} = \mathbf{p}(x_{\mathbf{p}}, y_{\mathbf{p}})$ na konturze profilu są odpowiednio równe:

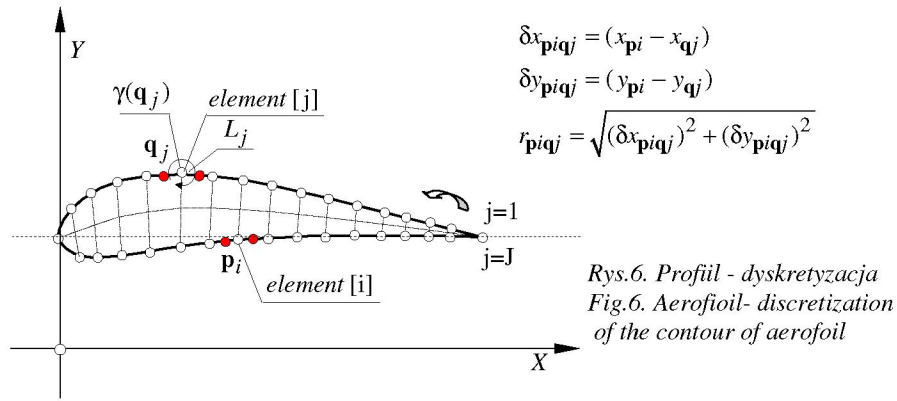
$$\begin{aligned} u_s(\mathbf{p}) &= \gamma(\mathbf{p}) \quad ; \quad u_n(\mathbf{p}) = 0 \\ u_x(\mathbf{p}) &= u_s(\mathbf{p}) \cos(\alpha_{\mathbf{p}}) \quad , \quad u_y(\mathbf{p}) = u_s(\mathbf{p}) \sin(\alpha_{\mathbf{p}}) \end{aligned} \quad (5)$$

natomiast składowe prędkości $u_x(\mathbf{v}), u_y(\mathbf{v})$ w punktach $\mathbf{v} = \mathbf{v}(x_{\mathbf{v}}, y_{\mathbf{v}}) \notin (L)$ obszaru przepływu można wyznaczyć ze związków:

$$u_x(\mathbf{v}) = + \int_{(K)} \gamma(\mathbf{q}) \left(\frac{\delta y_{\mathbf{q}\mathbf{v}}}{2\pi r_{\mathbf{q}\mathbf{v}}} \right) dl_{\mathbf{q}} \quad , \quad u_y(\mathbf{v}) = - \int_{(K)} \gamma(\mathbf{q}) \left(\frac{\delta x_{\mathbf{q}\mathbf{v}}}{2\pi r_{\mathbf{q}\mathbf{v}}} \right) dl_{\mathbf{q}} \quad . \quad (6)$$

2.2 Numeryczne rozwiązanie całkowego równania opływu profilu

W ramach metody brzegowych równań całkowych dokonuje się dyskretnego rozwiązania równania, przybliżając linię brzegową skończonym układem linii cząstkowych w postaci elementów prostych lub łukowych (rys. 6) i zakładając, że rozwiązane równania całkowe są spełnione wraz z warunkami brzegowymi na tych liniach.



W najprostszym przypadku metody panelowej rozwiązywania zagadnień opływu profilu przyjmuje się elementy prostoliniowe o stałej gęstości wirowości na elementach, natomiast użytecznym sposobem dyskretyzacji konturu jest przybliżenie przy użyciu funkcji sklepanych [12], przy założeniu stałej gęstości wirowości na elementach. Przybliżając kontur układem elementów łukowych (funkcje sklepane 3 stopnia), równania całkowe (3a) i (3b) sprowadza się do układów algebraicznych równań liniowych względem dyskretnych wartości hydrodynamicznych osobliwości, o wymiarze równym liczbie linii cząstkowych przybliżających kontur profilu:

$$\sum_{j=1}^J \gamma(\mathbf{q}_j) H^*(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_j) L_j = u_x y_{\mathbf{p}i}^* + u_y x_{\mathbf{p}i}^* + \sum_{w=1}^W \Delta \Gamma_w - \Gamma_{crc} = 0, \quad (7)$$

gdzie:

$$H^*(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}_j) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\delta x_{\mathbf{p}i\mathbf{q}j} y_{\mathbf{p}i}^* - \delta y_{\mathbf{p}i\mathbf{q}j} x_{\mathbf{p}i}^*}{r_{\mathbf{p}i\mathbf{q}j}^2} \right) , \quad (7^*)$$

$$H^*(\mathbf{q}_j, \mathbf{q}_j) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{y_{\mathbf{p}i}^* x_{\mathbf{p}i}^{**} - x_{\mathbf{p}i}^* y_{\mathbf{p}i}^{**}}{(x_{\mathbf{p}i}^*)^2 + (y_{\mathbf{p}i}^*)^2} \right)$$

przy czym $x_{pi}^* = (dx/dL)_i$, $y_{pi}^* = (dy/dL)_i$; $x_{pi}^{**} = (d^2x/dL^2)_i$, $y_{pi}^{**} = (d^2y/dL^2)_i$.

Po wyznaczeniu gęstości osobliwości $[\gamma(\mathbf{q}_j)]_{j=1}^J$ w punktach centralnych elementów L_j na profilu wyznacza się wartości współczynnika ciśnienia:

$$c_p(\mathbf{q}_j) = \frac{p(\mathbf{q}_j) - p_\infty}{\frac{\rho u^2}{2}} = 1 - \left(\frac{u(\mathbf{q}_j)}{u} \right)^2, \quad (8)$$

oraz cyrkulację wokół profilu, składowe pola prędkości i linie prądu.

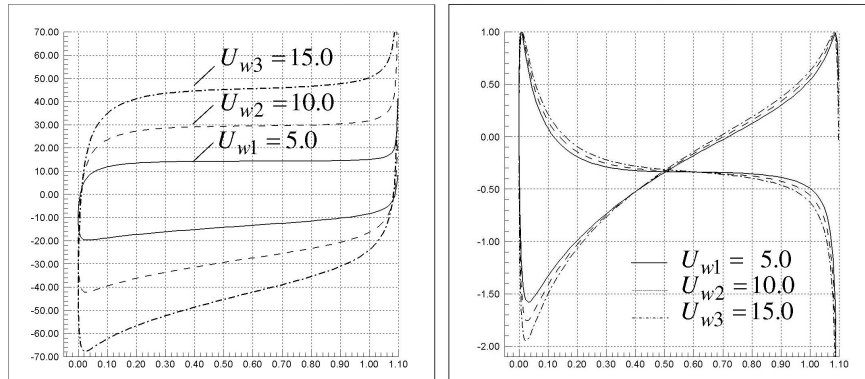
4 Wyznaczenie opływu rotora wiatrowego

Przedstawioną wyżej metodą wyznaczono przepływ przez dwułopatowy rotor o prostych łopatach o profilu NACA_0018 i wymiarach:

- średnica wirnika $D=1600$ mm,
- wysokość łopat $H=1100$ mm,
- długość cięciwy $c=110$ mm profil NACA_0018.

Obliczenia przeprowadzono dla trzech wartości prędkości strumienia napływającego na rotor, odpowiednio $U_{01} = 5.0$ m/s, $U_{02} = 10.0$ m/s, $U_{03} = 15.0$ m/s, którym przy założeniu stałej wartości współczynnika szybkobieżności rotora $\lambda=2.0$ i współczynnika straty prędkości strumienia wiatru $a_1 = 0.4$, $a_2 = 0.3$, $a_3 = 0.2$ otrzymuje się odpowiednio:

- wartości kąta natarcia strumienia $\alpha_{w1}^\vartheta = 10^\circ 00'$, $\alpha_{w2}^\vartheta = 11^\circ 15'$, $\alpha_{w3}^\vartheta = 12^\circ 30'$
- wartości prędkości względnej $U_{w1}^\vartheta = 12.31$ m/s, $U_{w2}^\vartheta = 25.44$ m/s, $U_{w3}^\vartheta = 39.40$ m/s
- prędkości rotacji wirnika $\omega_1 = 12.5$ rad/s, $\omega_2 = 25.0$ rad/s, $\omega_3 = 37.5$ rad/s.



Rys. 7. Charakterystyki opływu profilu rotora: (a) wykres prędkości względnej; (b) wykres współczynnika ciśnienia

Fig. 7. Rotor characteristics: (a) relative velocity distribution on the profile; (b) pressure coefficient chart

Podsumowanie

Przedstawiony wyżej algorytm obliczeniowy wyznaczania pola prędkości i aerodynamicznych charakterystyk w laminarnym opływie profili płynem doskonałym w ograniczonym zakresie kątów natarcia, pomimo istotnych uproszczeń dotyczących modelu płynu i modelu przepływu, jest skutecznym narzędziem obliczeniowym do rozwiązywania pewnej klasy zagadnień przepływowych teorii profilu i teorii palisady profili. Zastosowanie funkcji sklepanych do opisu współrzędnych profilu [14] umożliwia precyzyjny opis kształtu profili i pozwala na przyjęcie w dyskretnym rozwiązaniu równań całkowych odpowiednio dużej liczby elementów liniowych przybliżających kształt konturu. Użycie dużej liczby prostoliniowych elementów przybliżających kontur generuje duże układy równań liniowych (8), których rozwiązanie prowadzi do wyznaczenia prędkości stycznej, to właściwość metody obliczeniowej pozwalająca na przyjęcie stałych wartości gęstości osoblności na elementach. Skuteczność współczesnych metod rozwiązywania układów równań liniowych kompensuje tę niedogodność.

Obliczenia zagadnień aerodynamicznych są realizowane w Centrum Komputerowych Sieci Rozległych Politechniki Białostockiej na wieloprocesorowej maszynie wirtualnej (16xXSEON 2,4GHz, 16 GB RAM) przy wykorzystaniu oprogramowania sporządzonego w Politechnice Białostockiej (programy sporządzone przez autorów opracowania) w języku programowania FORTRAN.

Literatura

1. Parashchivou I.: *Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept*, Presses Internationales Polytechnique, Canada 2009
2. Martens S.: *Wind Energy in the Built Environment Concentrator Effect of Buildings* Multi-Science, England 2006
3. Hansen M.O.: *Aerodynamics of wind turbines* (2 ed.), EARTHSCAN 2008
4. Batchelor G.K.: *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press 1967
5. Prosnak W. J.: O automatycznym rozwiązywaniu podstawowego zagadnienia teorii profilu. *Prace IPPT PAN* 321 972
6. Prosnak W.J.: *Teoria układu profilów lotniczych*, Ossolineum, 1982
7. Fletcher: *Computational Techniques for Fluid Dynamics* Vol. I. *Fundamental and General Techniques*, Vol. II. *Specific Techniques for Different Flow Categories*. Springer-Verlag, 1991
8. Lewis R.I.: *Vortex Element Methods for Fluid Dynamic Analysis of Engineering Systems*. Cambridge Univ. Press, 1991
9. Pozrikidis C.: *Introduction to Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Oxford University Press, 1997
10. Safman P.G.: *Vortex Dynamics*, Cambridge University Press, 1992
11. Cottet G.H., Koumoutsakos P.D.: *Vortex Methods. Theory and Practice*, Cambridge University Press, 2000
12. Sorko S.A.: Zastosowanie funkcji sklepanych do wyznaczania kształtu profili lotniczych. *Rozprawy Naukowe* 32, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej 1995

13. Ragheb M., Ragheb A.: Wind Turbines Theory- The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio in (ed. R. Cariveau) *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power InTech*, 2011
14. Ladopoulos E.G.: Singular Integral Equations *Linear and Nonlinear Theory and its Applications in Science and Engineering*, Springer, 2000

Streszczenie

Wirniki rotorów wiatrowych (VAWT – *Vertical Axis Wind Turbine*) są konstruowane jako układy kształtowych lub profilowanych elementów powierzchniowych tworzących palisady wirnikowe o pionowej osi obrotu. W opracowaniu przedstawiono matematyczny opis zagadnienia przepływu przez cząstkowe sekcje wirnika rotora wiatrowego typu Darrieusa o profilowanych łopatach przy użyciu równań całkowych, dyskretyzację równań całkowych (metoda panelowa), algorytm wyznaczania pól prędkości i ciśnienia oraz wyznaczania charakterystyk użytkowych rotorów wiatrowych o pionowej osi obrotu wirnika.

The modelling of aerodynamic parameters of the wind power engineering devices III. The aerodynamic analysis of the vertical axis wind turbines

Summary

An object of the elaboration is the computational method solution of the flow through rotors of vertical axis wind turbines (Darrieus H-totor-type) and calculations of aerodynamic characteristics of these devices. One presented the computational algorithm based on the idea of the partition of the axial rotor on elementary rotors and the conformal mapping of aerofoil cascades on axis-symmetrical surfaces on flat straight cascades in which flow through the cascade and its aerodynamic characteristics are calculated by the method of hydrodynamic singularities.

Opracowanie zrealizowano w ramach pracy statutowej nr S/WBiIŚ/4/2014 Katedry Ciepłownictwa Politechniki Białostockiej.