

i wynosi ok. 20 m/s. W rurze ssącej prędkość ta znacznie spada i u wylotu wynosi ok. 3,5 m/s.

3. Analizując rozkład ciśnienia, stwierdzono, że największe podciśnienie występuje na łopatkach turbiny. W rurze ssącej ciśnienie w obrębie górnej powierzchni kolana jest ok. dwukrotnie mniejsze niż ciśnienie hydrostatyczne, i mimo że wartości chwilowe są niższe niż ciśnienie parowania wody w temperaturze 10 °C, to jednak wartości uśrednionego po czasie ciśnienia są znacznie powyżej granicy pojawiania się kawitacji.

Literatura

[1] Arndt R., Cavitation in Vortical Flows, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 34, (2002), 143 – 75.

[2] Kumar P., Saini R.P., Study of cavitation in hydro turbines-A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, (2010), 374 – 383.

[3] Escalera X., Egusquiza E., Farhat M., Avelanb F., Coussirat M., Detection of cavitation in hydraulic turbines, *Mech. Sys. Signal Processing* 20, (2006) 983 – 1007.

[4] Müller A., Dreyer M., Andreini N., Avellan F., Draft tube discharge fluctuation during self-sustained pressure surge: fluorescent particle image velocimetry in two-phase flow, *Exp Fluids* (2013) 54: 1514.

[5] Vučković S., Širok B., Jošt D., Bajcar T., The Identification of a Vortex in the Draft-Tube Cone of a Model Francis Turbine, *Int. J. Dyn. Fluids*, Vol. 3, 2 (2007), pp. 133 – 152.

[6] Lipej A., Jošt D., Mežnar P., Djelić V., Numerical prediction of pressure pulsation amplitude

for different operating regimes of Francis turbine draft tubes, *Int. J. of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 2, No. 4, 2009.

[7] Jošt D., Lipej A., Numerical Prediction of Non-Cavitating and Cavitating Vortex Rope in a Francis Turbine Draft Tube, *J. Mech. Eng.* 57 (2011) 6, 445 – 456.

[8] Wu Y., Liu S., Dou H., Zhang L., Simulations of unsteady cavitating turbulent flow in a Francis turbine using the RANS method and the improved mixture model of two-phase flows, *Engineering with Computers* (2011) 27: 235 – 250.

[9] Wu Y., Liu J., Sun Y., Liu S., Zuo Z., Numerical analysis of flow in a Francis turbine on an equal critical cavitation coefficient line, *J. Mech. Sci. Techn.* 27 (6), (2013), 1635 –1641.

mgr Agnieszka Woźniak*

Wpływ obecności gondoli na kształt łopatek wirnika turbiny wiatrowej o poziomej osi obrotu

The influence of the nacelle for blade horizontal axis wind turbine

Streszczenie. Dobrze znane metody konstrukcji łopatek turbin wiatrowych o poziomej osi obrotu oparte są na napływie jednorodnym [1], natomiast prawdziwe turbiny wiatrowe pracują w niejednorodnym strumieniu. Przyczyną tej niejednorodności może być obecność gondoli wiatraka. Celem artykułu jest przedstawienie wpływu obecności gondoli na kształt łopatek wirnika turbiny wiatrowej, tj. kształt cięciwy i kąta skręcenia. Opisana metoda łączy twierdzenie Betza o minimalnej mocy indukowanej śmigłem z modyfikowaną teorią opływu ciała smukłego oraz zasadą zachowania pędu i momentu pędu w przypadku elementu łopaty wirnika.

Słowa kluczowe: turbina wirnika, aerodynamika turbiny wiatrowej.

Abstract. Well established methods of wind turbine blades aerodynamic design are founded on assumption of uniform inflow. Real wind turbine works in non-uniform stream affected by vertical velocity gradient, nacelle. It seems that the effect for small turbine will be strong. The purpose of the present paper is investigation of nacelle on shape of the blade i.e. radial chord and twist distribution in so-called reverse (design) problem for HAWT. In the paper a sample calculations of the rotor geometry for given conditions has been presented. It was shown that the presence of nacelle has an appreciable influence on twist and chord distribution in the inner portion of the rotor disk.

Keywords: wind turbine, wind turbine aerodynamics.

Moc zawarta w strumieniu powietrza wzrasta z trzecią potęgą prędkości wiatru oraz liniowo ze wzrostem rozmiarów wirnika. Z tego powodu ogromne znaczenie ma posadowienie elektrowni wiatrowej w miejscu o możliwie korzystnych warunkach wiatrowych. W przypadku gdy wybór terenu jest już przesądzony, znaczenia nabiera powierzchnia wirnika.

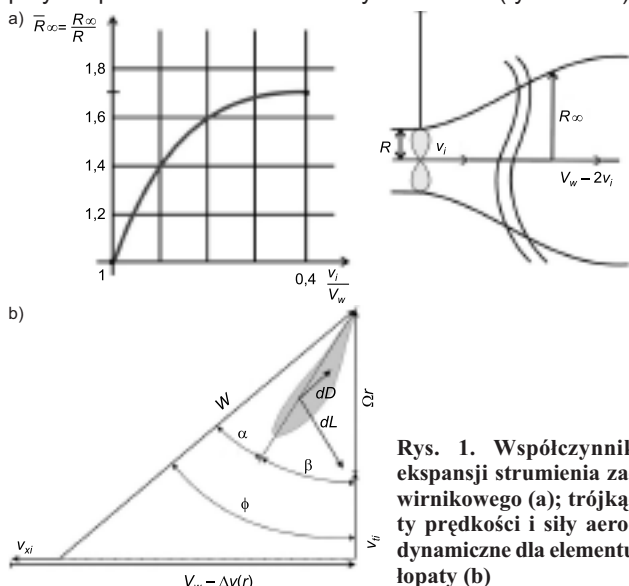
Od kilkudziesięciu lat zauważamy trwały wzrost rozmiarów wirnika, a wraz z nim dużego znaczenia nabierają aspekty projektowania oraz wykonania łopatek wirnika turbiny wiatrowej. Ostateczny kształt łopaty jest wynikiem kompromisu pomiędzy wieloma czynnikami, takimi jak:

obciążenia aerodynamiczne; wydajność; koszty produkcji; stabilność aeroelastyczna i obciążenia zmęczeniowe [2, 3]. Wiedząc, że wydatki poniesione na produkcję łopatek stanowią ok. 10% całkowitych kosztów turbiny wiatrowej, uzasadnione jest inwestowanie w innowacyjne rozwiązania konstrukcji łopatek, metody ich wykonania oraz stosowane materiały. Dobrze dobrana konstrukcyjnie łopata pozwala zmniejszyć wymagania stawiane paście i wieży, obniżyć koszty produkcji i eksploatacji turbiny wiatrowej oraz wpłynąć na wydajność produkcji energii. W artykule poruszono problem optymalnego kształtu łopaty wirnika turbiny wiatrowej uwarunkowanego obecnością gondoli.

* PWSZ im. Stanisława Pigonia w Krośnie, Instytut Politechniczny

Zagadnienie projektowe w przypadku napływu niejednorodnego osiowo-symetrycznego

Do celów analizy założono, że przepływ powietrza wokół gondoli jest potencjalny, składowa osiowa napływu na tarczę wirnika jest super pozycją jednorodnego rozkładu prędkości wiatru i prędkości wywołanej wpływem gondoli; prędkość przemieszczenia się śladu jest stała, a wirnik „umiarkowanie obciążony”. Ostatnie założenie oznacza, że twierdzenie o minimalnej mocy indukowanej Betza [1] jest spełnione. Jest to uzasadnione tym, że zaburzenie w polu przepływu indukowane przez gondolę znika z dala od gondoli. Sposób modelowania gondoli jest podobny do podejścia w aerodynamice śmigłowców [4]. Umiarkowane obciążenie oznacza, że prędkość indukowana w płaszczyźnie wirnika osiąga znaczną wartość, natomiast ekspansja strumienia jest jeszcze mała [5, 6], np. dla $v_i/V_w = 10\%$ stosunek $R/R_\infty \cong 1,061\%$, zatem przyrost przemieszczenia śladu wynosi ok. 6% (rysunek 1a).



Rys. 1. Współczynnik ekspansji strumienia zawirnikowego (a); trójkąty prędkości i siły aerodynamiczne dla elementu łopaty (b)

Wykorzystując twierdzenie Żukowskiego, wyrażenie na elementarną moc idealną można zapisać:

$$dN_{id} = \Omega \rho W B \Gamma \sin \phi r dr \quad (1)$$

gdzie:

- Ω – prędkość kątowna;
- W – względna prędkość napływu na element łopaty;
- B – liczba łopatek;
- Γ – cyrkulacja;
- ϕ – lokalny kąt napływu; ρ – gęstość powietrza;
- r – promień elementu łopaty.

Z zależności geometrycznych przedstawionych na rysunku 1b otrzymuje się zależność:

$$dN_{id} = \Omega \rho B \Gamma (V_w(1 - \Delta v) - v_{xi}) r dr \quad (2)$$

gdzie:

- Δv – prędkość wzbudzona obecnością gondoli;
- V_w – prędkość wiatru;
- v_{xi} – składowa osiowa prędkości indukowanej.

Elementarną moc idealną można obliczyć również z zasady zachowania pędu:

$$dN_{id} = 4\pi \Omega \rho (V_w(1 - \Delta v) - v_{xi}) v_{ti} F r^2 dr \quad (3)$$

gdzie:

- F – współczynnik strat wierzchołkowych Prandtla.

Uwzględniając składową momentu obrotowego wynikającą z oporu profilowego elementu łopaty, można wyrazić całkowitą moc absorbowaną przez śmigło za pomocą zależności:

$$dN = dN_{id} (1 - \varepsilon \operatorname{ctg} \phi) \quad (4)$$

gdzie:

$\varepsilon = (C_D/C_L)$ jest odwrotnością doskonałości aerodynamicznej profilu.

Biorąc pod uwagę straty profilowe, wzór (4) można zapisać w postaci:

$$dN = 4\pi \Omega \rho (V_w(1 - \Delta v) - v_{xi})(1 - \varepsilon \operatorname{ctg} \phi) v_{ti} F r^2 dr \quad (5)$$

Po uwzględnieniu zależności pomiędzy składowymi v_{ti} i v_{xi} oraz prędkością śladu wirowego v' opisanych równaniami:

$$v_{xi} = \frac{1}{2} v' \cos^2 \phi \quad (6)$$

$$v_{ti} = \frac{1}{2} v' \cos \phi \sin \phi \quad (7)$$

a następnie po zapisaniu równania (5) w formie bezwymiarowej i eliminacji prędkości indukowanej za pomocą wzorów (6), (7) (całkując od ξ_0 do 1, gdzie $\xi = r/R$ oznacza promień bezwymiarowy, czyli stosunek promienia elementu łopaty r do całkowitego promienia wirnika R), otrzymuje się równanie całkowe (8), które wiąże prędkość przemieszczenia śladu ze współczynnikiem mocy;

$$\bar{v}'^2 - \frac{2C_1}{C_2} \bar{v}' + \frac{C_p}{2C_2} = 0 \quad (8)$$

gdzie:

$$C_1 = \int_{\xi_0}^1 \lambda \cos^2 \phi (1 - \Delta v) (\varepsilon - \operatorname{tg} \phi) F \xi^2 d\xi \quad C_2 = \int_{\xi_0}^1 \lambda \cos^4 \phi (\varepsilon - \operatorname{tg} \phi) F \xi^2 d\xi$$

Rozwiązując równanie kwadratowe (8) otrzymamy:

$$\bar{v}' = \frac{C_1}{C_2} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{C_p C_2}{2C_1^2}} \right] \quad (9)$$

Wykorzystując wzór Żukowskiego oraz znając współczynnik strat wierzchołkowych, otrzymuje się równanie (10) na odrys łopaty $\bar{c} = \bar{c}(\xi)$:

$$\bar{c}(\xi) = \frac{8\pi}{B} \cdot \frac{\bar{v}_{ti} \xi F}{W C_L(\xi)} \quad (10)$$

gdzie:

$$\bar{W} = \sqrt{(1 - \Delta \bar{v} - \bar{v}_{xi})^2 + (\lambda + \bar{v}_{ti})^2} \quad (11)$$

Po tych analizach można obliczyć kąt nastawienia łopaty β na podstawie znanego kąta napływu ϕ i kąta natarcia α (rysunek 1b): $\beta = \phi - \alpha$. Wartość kąta natarcia w danym przekroju wynika z założonego współczynnika siły nośnej.

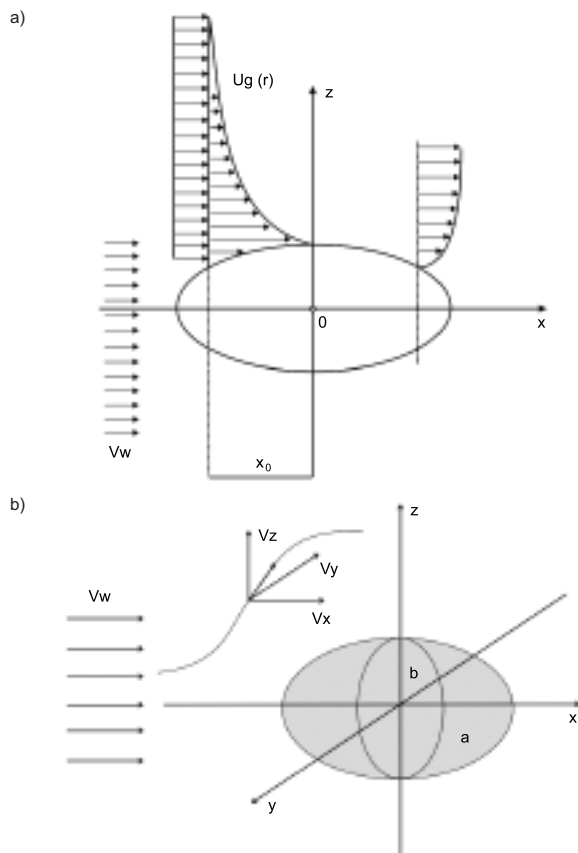
Wpływ kształtu gondoli

Gondolę turbiny wiatrowej modelujemy elipsoidą obrotową, gdzie główna oś $a = 0,25R$, natomiast oś mniejsza $b = 0,20R$ (rysunek 2). W przypadku przepływu wokół elipsoidy [3], potencjał prędkości jest podany w eliptycznych współrzędnych przez następujące wyrażenie:

$$\phi(\mu, \nu, \omega) = V_w k \mu \nu + A \mu \left[\frac{1}{2} \nu \ln \left(\frac{\nu+1}{\nu-1} \right) - 1 \right] \quad (12)$$

Wykorzystując osiowy składnik prędkości, można obliczyć nominalne pole prędkości w płaszczyźnie wirnika. Osiowa składowa prędkości wzbudzonej (rysunek 2) jest równa:

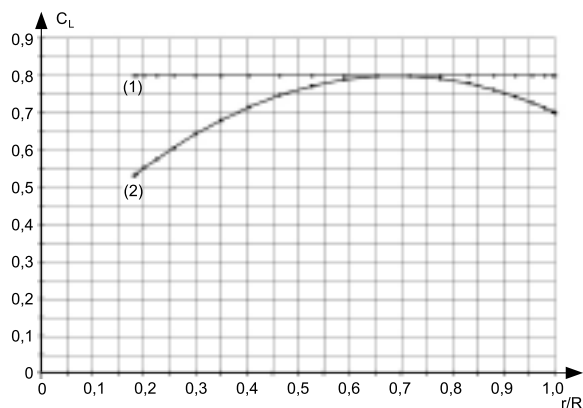
$$\Delta v = -\frac{A}{k} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{\nu+1}{\nu-1} \right) - \frac{\nu}{\nu^2 - \mu^2} \right] \quad (13)$$



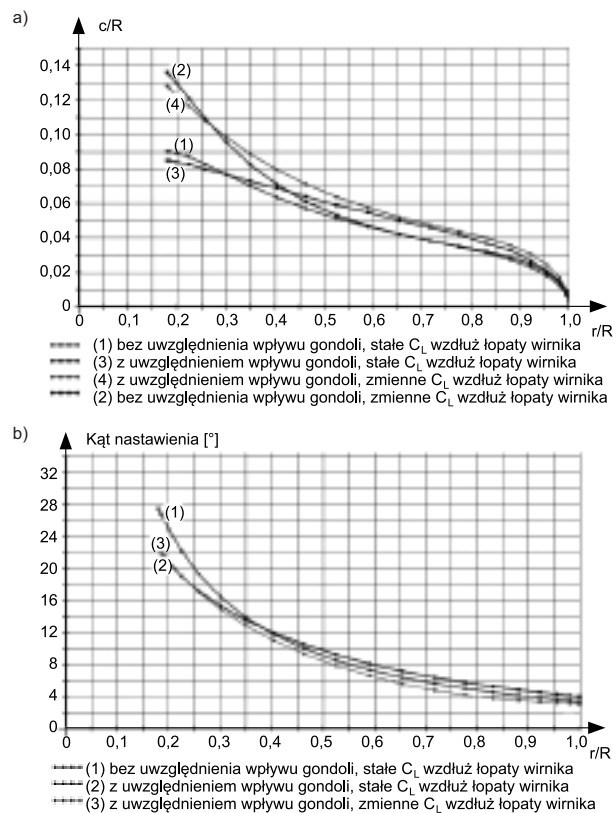
Rys. 2. Zaburzenie pola prędkości generowane przez gondolę
Wyniki przykładowych obliczeń projektowych

Do obliczeń przyjęto warunki, w których prędkość wiatru wynosi 14 m/s, gęstość powietrza $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$, a w takich warunkach pracuje trójłopatowa elektrownia średnicy 40 m ($R = 20 \text{ m}$) i mocy na wale 500 kW. Otrzymany z obliczeń rozkład współczynnika siły nośnej C_L pokazany jest na rysunku 3.

Analizy obliczeniowe wykazały, że łopaty wirnika pracującego w obecności gondoli powodują wzrost cięciwy łopatek i zmniejszenie kąta ich nastawienia w wewnętrznej części tarczy wirnika w stosunku do pracy w warunkach napływu jednorodnego, tj. bez gondoli, co przedstawiono na rysunku 4. Interesujące jest to, że pomimo różnic w geometrii łopatek 1 i 2 rozkład kątów nastawienia β jest podobny. Różnice dotyczą tylko tych kątów dla $r/R > 0,5$.



Rys. 3. Obliczone współczynniki siły nośnej na łopacie wirnika



Rys. 4. Rozkłady cięciw c dla przepływu jednorodnego i niejednorodnego (a); rozkłady kątów nastawienia łopaty β dla przepływu jednorodnego i niejednorodnego (b)

Wnioski

Przeprowadzone analizy wykazały, że obecność gondoli może mieć duży wpływ na optymalny kształt łopatek wirnika. Wyniki przedstawionych analiz (rysunki 3 i 4) mogą być przydatne w doborze optymalnej geometrii łopatek wirników turbin wiatrowych. Geometria ta ma również realny wpływ na wartości statycznych i dynamicznych obciążeń trzonu turbiny [7]. Wykonanie łopat elektrowni wiatrowej o dużej średnicy wirników jest zadaniem bardzo ważnym i wymaga dopracowania pod względem konstrukcyjnym, technologicznym, wykonawczym i badawczym.

Literatura

- [1] Larrabee E. E., Practical Design of Minimum Induced Loss Propellers, SAE Transactions 790585, Society of Automotive Engineers, 1979.
- [2] Hansen M. O. L., Sorensen J. N., Voutsinas S., State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity, Progress in Aerospace 42, 2006.
- [3] Flaga A., Obciążenia wiatrem budowli smukłych jako zagadnienie statyczne i dynamiczne przestrzenne, Archiwum Inżynierii Łądowej, tom XXXII (1), 1986, 115 – 127.
- [4] Yamauchi G., Johnson W., Development and application of an analysis of axisymmetric body effects on helicopter rotor aerodynamics using modified slender body theory. NASA TM-85934, 1984.
- [5] Strzelczyk P., Wybrane zagadnienia aerodynamiki śmigieł, Oficyna Wydawnicza PRz Rzeszów 2009.
- [6] Strzelczyk P., The Method Of Calculation Of Horizontal Axis Wind Turbine Performance At Yawed Flow Conditions By The Use Of Simplified Vortex Method, The Archive of Mechanical Engineering, Vol. LIII No. 3 2006, str. 1 – 14.
- [7] Żurański J. A., Obciążenia wiatrem budowli i konstrukcji, Biblioteka Inżynierii i Budownictwa, Arkady, Warszawa, 1969.