

WYZNACZENIE OBCIĄŻENIA AERODYNAMICZNEGO W MODELU ELEKTROWNI WIATROWEJ MAŁEJ MOCY

MAREK KOŹLAK, MARIUSZ PAWLAK

Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska

email: marek.kozlak@polsl.pl, mariusz.pawlak@polsl.pl

Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawiony jest sposób doboru profili aerodynamicznych oraz optymalnych parametrów aerodynamicznych poszczególnych komponentów elektrowni wiatrowej małej mocy o poziomej osi obrotu. Własności aerodynamiczne łopat zostały ustalone poprzez założenie optymalnego stosunku współczynników sił nośnych do sił oporu wybranych profili aerodynamicznych przy zadanych prędkościach wiatru. Łopaty wzorowane są na maszynach dużej mocy, z wykorzystaniem dwóch dźwigarów jako elementów nośnych, przy stałych grubościach poszycia oraz trzech różnych profilach rozmieszczonych wzdłuż osi łopaty.

Analizę aerodynamiczną przeprowadzono w środowisku inżynierskim Matlab z wykorzystaniem metody BEM (Blade Element Momentum). Jako dane wejściowe zadane były współczynniki sił nośnych oraz współczynniki sił oporu w funkcji kąta natarcia. Są to wielkości charakterystyczne dla każdego z profili aerodynamicznych, zwykle wyznaczane w tunelach aerodynamicznych. Współczynniki aerodynamiczne wykorzystane w pracy zostały zaczerpnięte z danych literaturowych. Na wyjściu uzyskano rozkład sił aerodynamicznych na łopacie przy różnych prędkościach wiatru oraz w różnych położeniu kątowym łopat. Uwzględniając obciążenie aerodynamiczne dla masztu elektrowni uzyskano stan obciążenia aerodynamicznego całego układu.

1. WPROWADZENIE

Przedstawiony artykuł jest częścią projektu mającego na celu zaprojektowanie małej elektrowni o poziomej osi obrotu, generującej energię przy niskich prędkościach wiatru. Źródłem energii będzie chwilowa prędkość wiatru, niewielki wpływ sił bezwładności w konsekwencji redukcji masy wirnika.

- Szacowana moc: 1 kW przy 10 m/s
- średnica wirnika: 3 m
- liczba łopat: 3

Własności aerodynamiczne łopat ustalono na zasadzie optymalnego stosunku między współczynnikami siły nośnej a siły oporu wybranych profili aerodynamicznych przy założonych zakresach prędkości wiatru. W łopatach dwa dźwigary usytuowane wewnątrz są odpowiedzialne za sztywność układu, poszycie górne oraz dolne o stałej grubości ścianek nadają kształt profili aerodynamicznych.

2. ROZKŁAD KĄTÓW ZWICHROWANIA ORAZ CIĘCIW

Wstępnie założono zastosowanie profili aerodynamicznych z serii FFA-W3-xxx oraz RISØ. Przy przyjętej długości łopatek $R=1.5$ m, stosunek prędkości stycznej noska łopaty do prędkości normalnej (prędkości wiatru) ustalono na poziomie:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_0} = 6 \quad (1)$$

Lokalne stosunki prędkości wyznacza się z równania:

$$x = \frac{r}{R} \lambda \quad (2)$$

Osiowe współczynniki oporu a wyznaczone są jako pierwiastki równania [2]:

$$16a^3 - 24a^2 + a(9 - 3x^2) - 1 + x^2 = 0 \quad (3)$$

Przy wyznaczonych wartościach osiowych współczynników oporu a , styczne współczynniki oporu wyznaczone są z relacji:

$$a' = \frac{1 - 3a}{4a - 1} \quad (4)$$

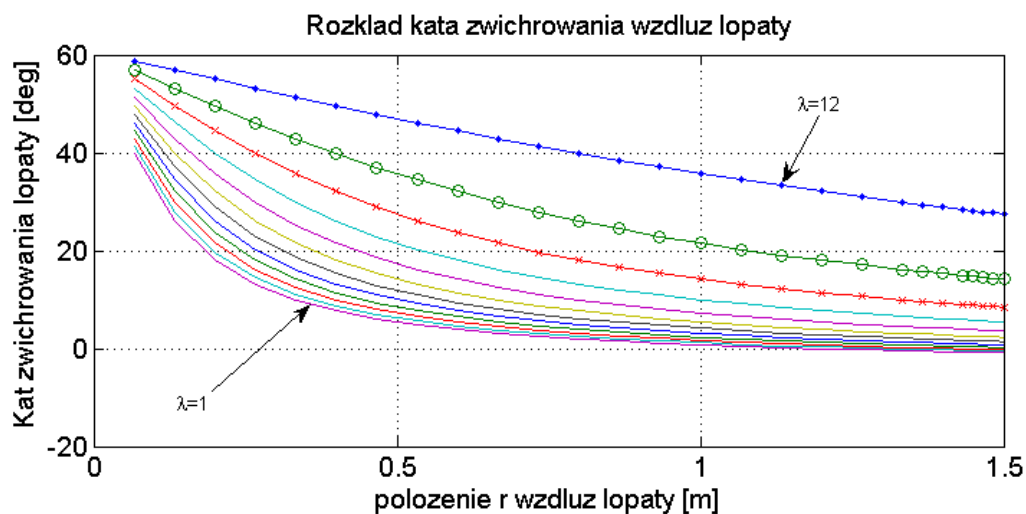
Rozkład kąta opływu wyznaczany jest ze wzoru:

$$\phi = \arctan \frac{(1 - a) \cdot \cos(\psi) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\gamma)}{(1 + a') \cdot x \cdot \cos(\beta) - (1 - a) \cdot \sin(\psi) \cdot \cos(\phi) - (1 - a) \cdot \sin(\gamma) \cdot \cos(\phi - \frac{\pi}{2})} \quad (5)$$

Kąt skreślenia łopaty jest wyznaczany jako różnica między kątem natarcia oraz kątem opływu:

$$\theta_{opt} = \phi - \alpha_{opt} \quad (6)$$

Regulując w pewnym zakresie kątem skreślenia łopaty, można sterować mocą uzyskiwaną z wiatru. Elektrownie tego typu noszą nazwę sterowanych przez zmianę ustawienia kąta łopatek. Globalny kąt skreślenia łopaty jest wówczas sumą kąta zwichrowania oraz kąta ustawienia łopaty.

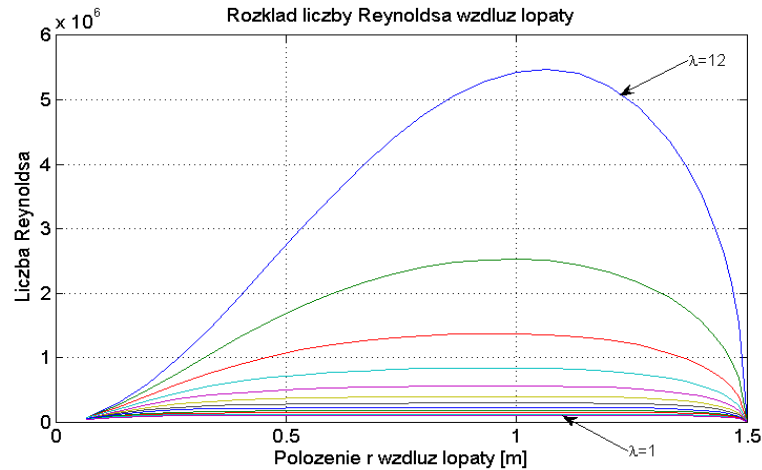


Rys. 1. Rozkład kątów zwichrowania wzdłuż łopaty

Kąt skręcenia łopaty zależy od stosunku λ na nosku łopaty. W przedstawianym rozważaniu przyjęto, że współczynnik λ wynosi 6.

Rozkład liczby Reynoldsa jest wyznaczany z równania:

$$\text{Re} = \frac{r \cdot \omega}{30} \cdot \frac{\text{chord}}{0.5} \cdot 10^6 \quad (7)$$



Rys. 2. Rozkład liczby Reynoldsa wzdłuż łopaty dla różnych stosunków prędkości λ na nosku łopaty

Współczynnik strat na nosku łopaty jest wyznaczany ze wzoru:

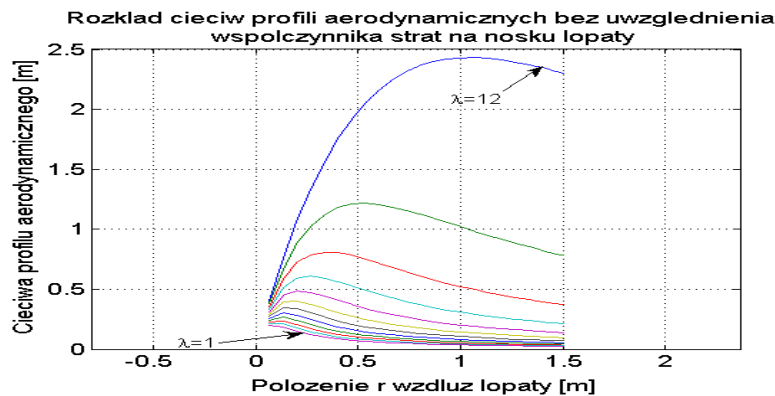
$$F = \frac{2}{\pi} \cdot \cos^{-1}(e^{-f}) \quad (8)$$

$$\text{gdzie } f = \frac{R-r}{2r \sin \phi_1} + \frac{R-r}{2r \sin \phi_2} + \frac{R-r}{2r \sin \phi_3} \quad (9)$$

ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 - kąty opływu poszczególnych łopat

Zależność umożliwiającą wyznaczenie optymalnego rozkładu cięciw $c(x)$ przy nieuwzględnionym współczynniku strat na nosku ma następującą postać:

$$\frac{c(x)}{R} = \frac{8 \cdot \pi \cdot a \cdot x \cdot \sin^2(\phi)}{(1-a) \cdot B \cdot C_n \cdot \lambda} \quad (10)$$



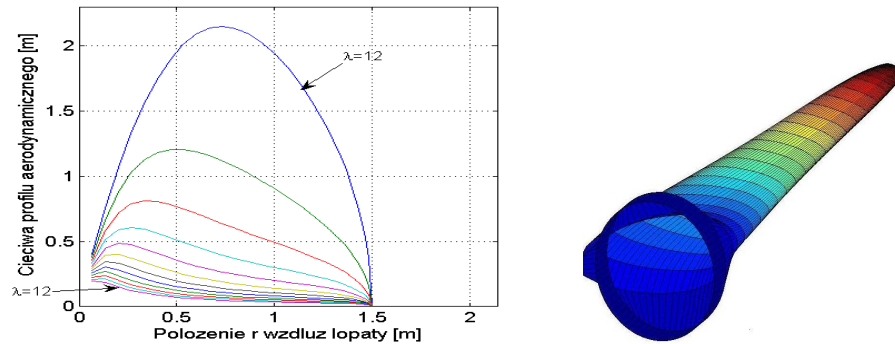
Rys. 3. Rozkład cięciw wzdłuż łopaty przy nieuwzględnionym współczynniku strat na nosku łopaty

Rozkład cięćw takiej łopaty jest podobny do tych stosowanych w starych młynach.

W przypadku uwzględnienia strat na nosku łopaty zależność będzie miała następującą postać:

$$\frac{c(x)}{R} = \frac{8 \cdot \pi \cdot a \cdot x \cdot F \cdot \sin^2(\phi)}{(1-a) \cdot B \cdot C_n \cdot \lambda} \quad (11)$$

Długości cięćw profili aerodynamicznych przy uwzględnionym współczynniku strat na nosku łopaty

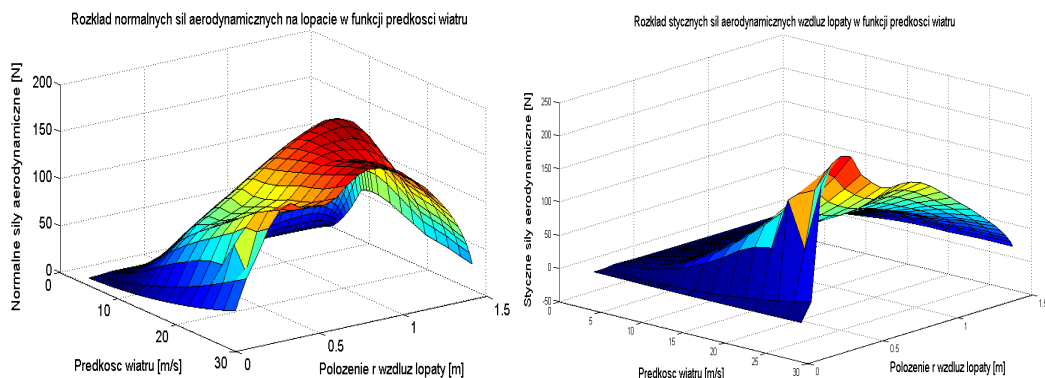


Rys. 4. Rozkład cięćw wzdluz łopaty przy uwzględnionym współczynniku strat na nosku łopaty

W przypadku uwzględniania strat na nosku, cięćwy łopat osiągają wartości maksymalne przy ok. 1/3 długości, po czym stopniowo maleją. Geometria ta jest charakterystyczna dla łopat stosowanych w nowoczesnych elektrowniach. W przypadku regulacji przez zmianę ustawienia kąta łopaty długości cięćw są mniejsze, łopaty są smuklejsze i lżejsze. Związane jest to z pomniejszeniem kąta zwichrowania (skręcenia) wzdluz łopaty o zakres regulacji kąta ustawienia łopaty oraz z większą dokładnością sterowania mocą elektrowni i obciążeniem wirnika.

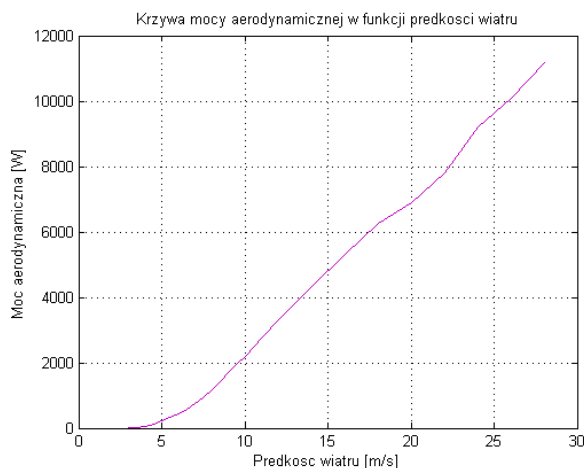
3. ROZKŁAD SIŁ AERODYNAMICZNYCH

Analizę aerodynamiczną przeprowadzono z wykorzystaniem metody zaimplementowanej w oprogramowaniu Matlab, dobrze opisanej w literaturze [2], której modyfikacje prezentowane były we wcześniejszych publikacjach [4]. Wynikiem przeprowadzonej analizy aerodynamicznej jest rozkład sił stycznych oraz sił normalnych generowanych na łopatach elektrowni przy różnych prędkościach wiatru.



Rys. 5. Rozkład sił stycznych oraz normalnych wzdluz łopaty w funkcji prędkości wiatru

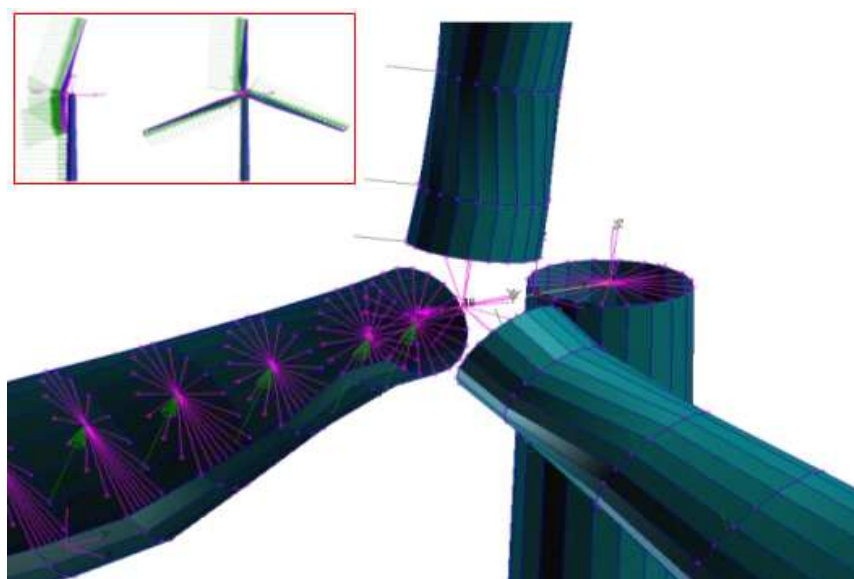
Wstępnie szacowano, iż moc 1kW powinna być uzyskana przy prędkości wiatru 10 m/s. W wyniku dokładniejszej analizy aerodynamicznej uzyskano krzywą mocy aerodynamicznej, prezentowaną na rys. 6.



Rys. 6. Krzywa mocy aerodynamicznej w funkcji prędkości wiatru

Na podstawie krzywej mocy szacowana moc aerodynamiczna 1 kW będzie uzyskana przy prędkości 7 m/s. Do wyznaczenia mocy mechanicznej potrzebne jest przeprowadzenie analizy z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Siły aerodynamiczne reprezentowane jako siły styczne oraz normalne przyłożone zostaną w środkach aerodynamicznych. Dokładny model łopaty uwzględni położenie środków aerodynamicznych, środków ciężkości oraz osi obojętnej [3].

Układ współrzędnych zastosowany przy modelowaniu elektrowni jest zgodny z DS 472 opisanym przez RISØ National Laboratory [1]. Aby połączyć środki aerodynamiczne ze profilami stanowiącymi poszycie łopat, w programie MSC Nastran zastosowano sztywne elementy skończone RBE2.



Rys. 7. Siły aerodynamiczne w modelu elektrowni wiatrowej

Element RBE2 definiujemy jako sztywne ciało z jednym węzłem (środkiem aerodynamicznym) o niezależnych stopniach swobody oraz grupą węzłów z zależnymi stopniami swobody. Utworzony model w programie MSC Nastran umożliwi uzyskanie informacji o zachowaniu się łopatek pod wpływem wiatru.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy aerodynamicznej przy prędkości 10 m/s moc aerodynamiczna elektrowni wynosiłaby 2 kW. Jednakże nie wzięto pod uwagę sił ciężkości oraz sił oporu. Aby oszacować moc mechaniczną możliwą do wygenerowania przez rzeczywistą elektrownię, potrzebna jest analiza z wykorzystaniem elementów skończonych z bardziej dokładnym modelem strukturalnym wirnika, przy znanych wartościach sił w łożyskach oraz na maszcie elektrowni. Również wskazana jest dalsza analiza interakcji między odkształceniem łopatek i masztu a wartościami sił aerodynamicznych.

LITERATURA

1. Guidelines for Design of Wind Turbines. 2nd edition, Det Norske Veritas and Riso National Laboratory, Jydske Centraltrykkeri, Denmark 2002
2. Hansen Martin O.L.: Aerodynamics of wind turbines. James&James Ltd, 2002.
3. Jureczko M., Pawlak M., Mężyk A.: Optimisation of wind turbine blades. Elsevier, „Journal of Materials Processing Technology” 2005, 167, s. 463-471.
4. Pawlak M., Mężyk A.: Aerodynamic loads in dynamics of HAWT rotor. EACWE 4, Prague, 11-15 July 2005.

ESTIMATION AND VISUALISATION OF AERODYNAMIC LOADS IN MODEL OF SMALL WIND TURBINE

Summary. In this article is described procedure of selecting aerodynamic profiles and optimal aerodynamic coefficients for small horizontal axis wind turbine. Aerodynamic properties of blades were specified by using the optimal ratio between lift and drag coefficients of selected aerodynamic profiles in assumed wind velocities. Blades are similar to those used in large wind turbines, where two spars are responsible for stiffness, constant lower and upper layer thickness are assumed with shape of three different aerodynamic profiles along the length of blade.

Aerodynamic analysis is made in Matlab, procedures are based on BEM (Blade Element Momentum) theory. The input data are lift and drag coefficients as a function of angle of attack. These coefficients are different for each aerofoil, usually calculated in aerodynamic tunnel. Data used in presented article was taken from literature. As a result of analysis the distribution of aerodynamic forces along the blade for different wind velocities and radial positions of blade were received.