

## ZAGADNIENIE INTERAKCJI POMIĘDZY AERODYNAMICZNYM I STRUKTURALNYM MODELEM ELEKTROWNI WIATROWEJ

MARIUSZ PAWLAK  
TOMASZ CZAPLA

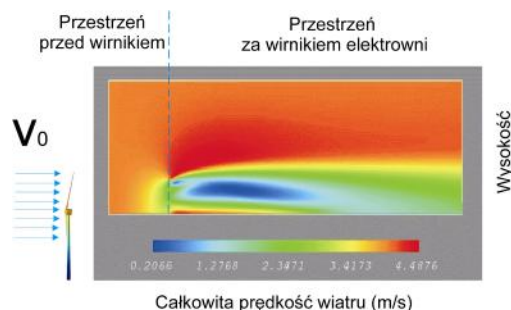
*Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska*

**Streszczenie:** Pod wpływem wiatru w profilach aerodynamicznych powstają siły aerodynamiczne powodujące odkształcenia łopatek elektrowni wiatrowej. Odkształcenia łopatek pociągają za sobą konieczność ponownego wyznaczenia wartości sił aerodynamicznych oraz odpowiadającego im poziomu odkształcenia. Działania te powtarzane są iteracyjnie aż do momentu uzyskania niewielkiej różnicy pomiędzy stanem początkowym i końcowym danej iteracji. W małych elektrowniach wpływ odkształcenia łopatek na stan obciążenia aerodynamicznego jest niewielki, często pomijany w komercyjnych aplikacjach dla wielkich elektrowni o długości łopatek powyżej 30 metrów. W niniejszym artykule prezentowane są rezultaty porównujące wyniki analizy statycznej z uwzględnieniem odkształcenia łopatek w modelu aerodynamicznym z wynikami nie uwzględniającymi ich odkształcenia.

### 1. WSTĘP

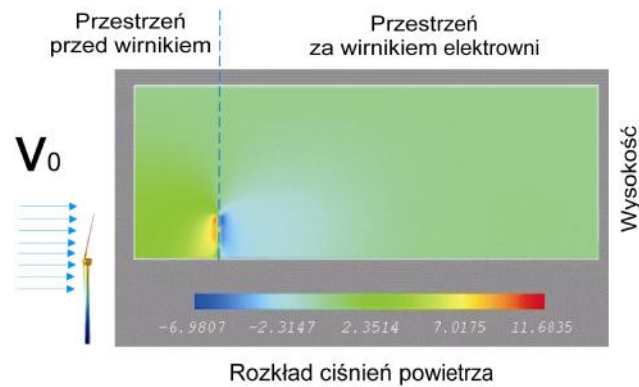
W analizie aerodynamicznej elektrowni wiatrowych o poziomej osi obrotu stosowane są modele oparte na teorii BEM (Blade Element Momentum), modele inżynierskie łączące metody BEM z modelowaniem wirów powstających za wirnikiem, aż do komputerowej mechaniki płynów, która rozwiązuje numerycznie równania Naviera-Stokesa oraz Eulera, gdzie pomijane jest zjawisko lepkości [2].

Na rysunkach przedstawionych poniżej prezentowane są przykładowe rozkłady prędkości oraz ciśnień występujących wokół wirnika elektrowni wiatrowej.



Rys. 1. Rozkład całkowitej prędkości wiatru w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny wirnika

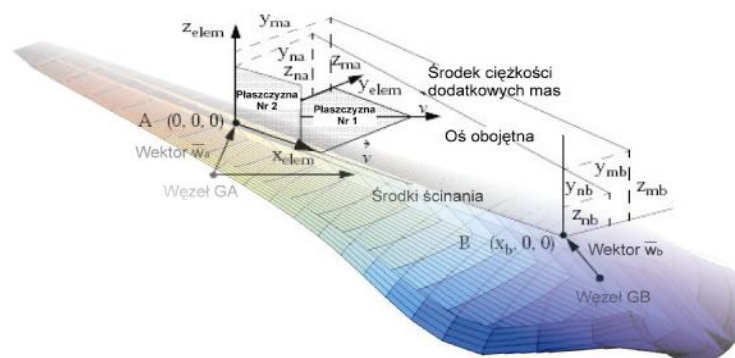
Na wykresie całkowitej prędkości wiatru widoczne są miejsca, w których prędkość wiatru za wirnikiem elektrowni spada prawie do zera. Duże różnice prędkości wiatru na wirniku elektrowni mają wpływ na naprężenia występujące w elektrowni. W przypadku elektrowni w farmach wiatrowych duże znaczenie ma zasięg strumienia nadążającego za wirnikiem elektrowni (odległość, na jakiej prędkość wiatru jest zredukowana oraz stopień redukcji prędkości wiatru).



Rys. 2. Rozkład ciśnień powietrza w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny wirnika [6]

Siły aerodynamiczne wyznaczone przez jednego z autorów wyznaczone są na podstawie zmodyfikowanej metody BEM, opisaną dokładniej w [5] oraz [7], gdzie wynikiem symulacji są wartości sił aerodynamicznych.

W koncepcji modelu strukturalnego wykorzystano elementy belkowe wg teorii Timoshenki, które umożliwiają uwzględnienie innego położenia środków ciężkości oraz środków ścinania. Węzły modelu umieszczone są w środkach aerodynamicznych, do których dołączone zostaną siły aerodynamiczne. Aerodynamiczny środek profilu jest to punkt, w którym aerodynamiczny moment skręcający generowany w profilu jest stały, niezależnie od kąta natarcia. Stosując środki aerodynamiczne jako miejsca działania sił aerodynamicznych wyeliminowany jest problem przemieszczania się środka ciśnień wraz ze zmianą kąta natarcia podczas analizy aerodynamicznej.



Rys. 3. Element belkowy wg teorii Timoshenki w programie MSC Nastran

W węzłach elementów belkowych są zamodelowane środki aerodynamiczne, za pomocą wektorów przesunięcia  $W_a$  oraz  $W_b$  jest uwzględnione w modelu położenie środków ścinania. Wektory  $Y_{na}$ ,  $Z_{na}$ ,  $Y_{nb}$  oraz  $Z_{nb}$  są zastosowane do uwzględnienia położenia środków grawitacji.

Siły aerodynamiczne działają w środkach aerodynamicznych [3], w modelu są przyłożone bezpośrednio do węzłów elementów belkowych, siły ciężkości natomiast działają w środkach ciężkości. Siły te, działając na określonym przesunięciu od środków ścinania, powodują powstawanie momentów skręcania.

## 2. ZAŁOŻENIA

Obiektem badań jest elektrownia wiatrowa o poziomej osi obrotu regulowana przez ustawienie kąta łopat, której wirnik składa się z trzech łopat. Moc maksymalna elektrowni wiatrowej wynosi 3 MW, wiatr działa na łopaty o długości 45 m każda, umieszczone przed masztem elektrowni wiatrowej. Maszt elektrowni wiatrowej o wysokości 78 metrów wykonany jest ze stalowych rur. Zakładamy, że oś obrotu wirnika znajduje się na wysokości 80 m. Kąt pomiędzy każdą z łopat wynosi  $\varphi=120^\circ$ . W analizie aerodynamicznej wystarczy więc dokonać obliczeń dla zakresu od 0 do  $120^\circ$ , aby w pełni scharakteryzować rozkład sił aerodynamicznych oraz mocy na wirniku elektrowni wiatrowej.

Do rozwiązywania zagadnienia dynamiki elektrowni wiatrowej wykorzystano program MSC Nastran. Analiza aerodynamiczna w celu wyznaczenia sił aerodynamicznych przeprowadzona została za pomocą autorskich algorytmów w środowisku Matlab.

Również model geometryczny elektrowni z wykorzystaniem macierzy transformacji jednorodnej został wygenerowany w tym środowisku. Automatycznie tworzone są pliki wejściowe do programu MSC Nastran [8], z geometrią, określonymi własnościami materiałowymi oraz różnymi wariantami obciążeń elektrowni. Umożliwia to analizę układu dla różnych wariantów obciążeń [1].

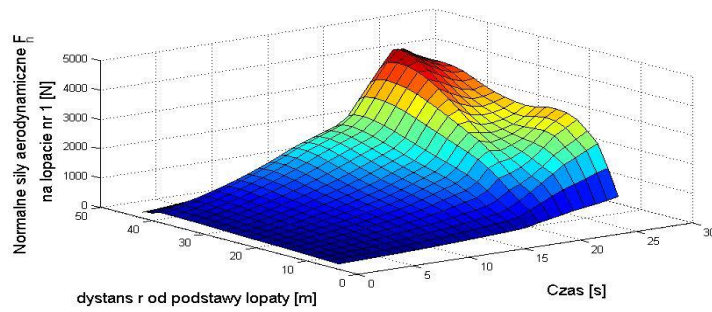
Na maszt elektrowni składa się 28 elementów belkowych, w każdej łopacie są 22 elementy belkowe. Dodatkowo wał elektrowni składa się z 3 elementów belkowych, pozostałe dwa elementy są to masa gondoli oraz masa piasty wirnika elektrowni.

## 3. WYNIKI

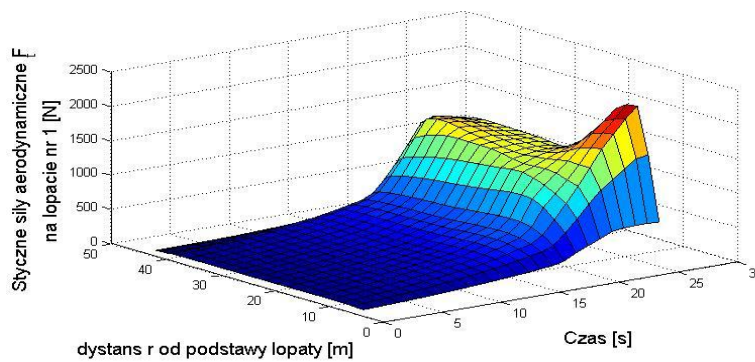
Wariantem obliczeń jest analiza przebiegu nieustalonego elektrowni przy ustawieniu kąta łopaty 3,5 [deg], przy prędkościach wiatru w zakresie od 3 do 28 m/s.



Rys. 4. Wykres zmiany prędkości wiatru przy ustawieniu kąta łopaty 3,5 [deg]

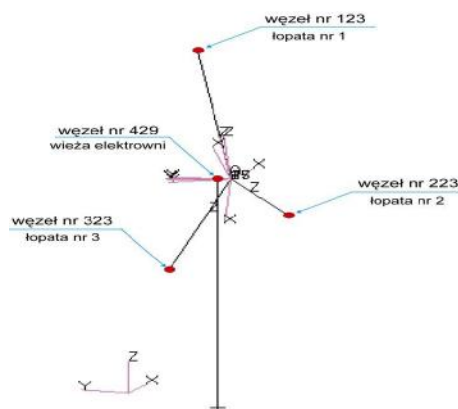


Rys. 5. Rozkład normalnych sił aerodynamicznych na łopacie nr 1 przy zmianie prędkości wiatru

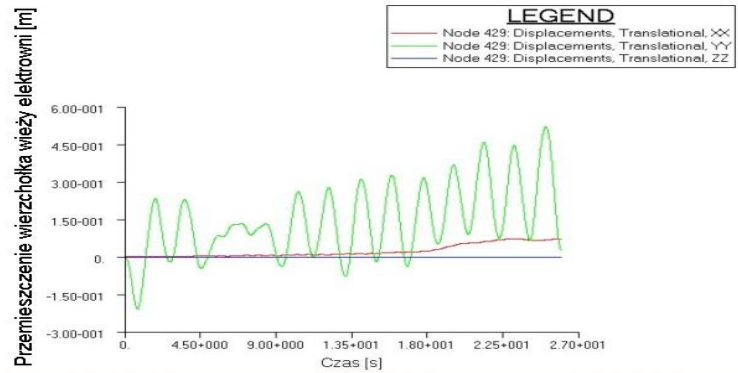


Rys. 6. Rozkład stycznych sił aerodynamicznych na łopacie nr 1 przy zmianie prędkości wiatru

Siły aerodynamiczne uwzględniono w modelu strukturalnym, analizie przeprowadzono z wykorzystaniem programu MSC Nastran. Wyniki symulacji prezentowane są w postaci przemieszczeń po osiach  $X$ ,  $Y$  oraz  $Z$  dla czterech charakterystycznych węzłów elektrowni w funkcji czasu:

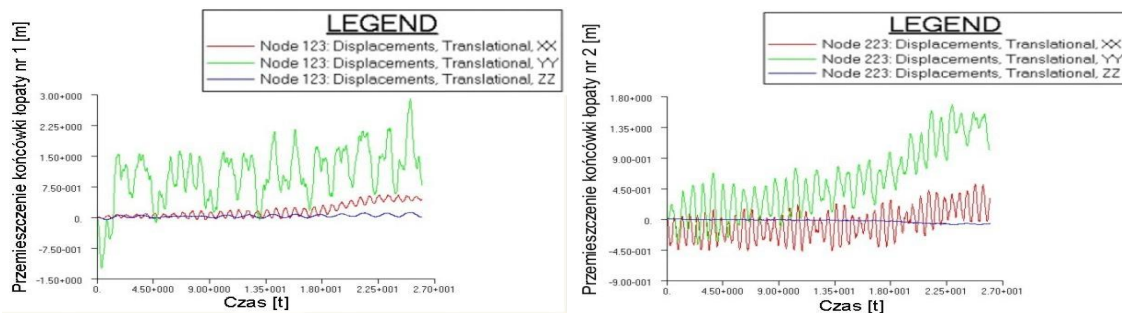


Rys. 7. Schemat elektrowni z zaznaczonymi węzłami, dla których zostaną zaprezentowane wykresy przemieszczeń



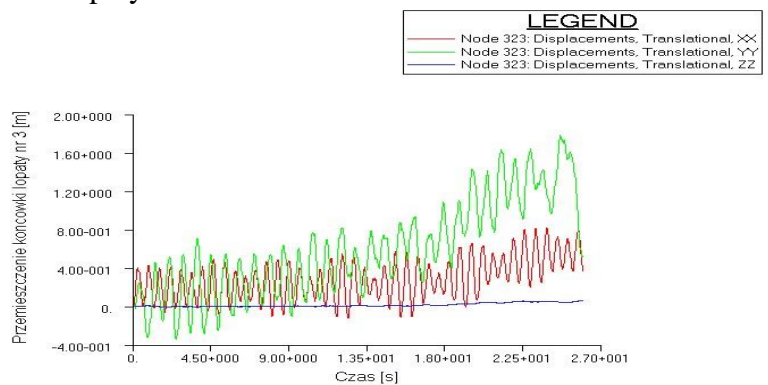
Rys. 8. Wykres przemieszczeń wierzchołka wieży elektrowni w czasie 26 sekund

Działające siły aerodynamiczne powodują przemieszczenie wierzchołka wieży oraz końców łopat w kierunku zgodnym z osią Y. Wartość przemieszczenia wierzchołka wieży elektrowni wzrasta wraz ze wzrostem prędkości wiatru.



Rys. 9. Wykres przemieszczeń końcówki łopaty nr 1 oraz nr 2 w czasie 26 sekund

Podobnie jak w poprzednim wariancie, największe przemieszczenie jest na końcu łopaty nr 1, najmniejsze na końcu łopaty nr 2.



Rys. 10. Wykres przemieszczeń końcówki łopaty nr 3 w czasie 26 sekund

#### 4. WNIOSKI

Zakładając, że łopaty w elektrowni wiatrowej są odchylone w stosunku do płaszczyzny wirnika o kąt 3 [deg] i uwzględniając ruch obrotowy wirnika, powstaną siły bezwładności w łopatach, powodujące odchylenie się łopat w kierunku do płaszczyzny wirnika. Poprzez działanie siły odśrodkowej zwiększa się sztywność każdej łopaty.

Wpływ zmiany prędkości wiatru jest zgodny z oczekiwaniami. Przy niższych prędkościach wiatru wierzchołek wieży oraz końce łopat przemieszczają się przeciwnie do osi Y. Wynika

to z tego, że składowe siły bezwładności w osi Y są większe od normalnych sił aerodynamicznych. Powyżej pewnej prędkości wiatru przemieszczenie łopaty jest zgodne z osią Y. Normalne siły aerodynamiczne przeważają nad składowymi siłami bezwładności działającymi w kierunku osi Y.

- Jeśli uwzględnić jedynie siły aerodynamiczne, wówczas przemieszczenia końców łopat po osi Y wynoszą 2 m, wartości przemieszczeń są zawyżone.
- Uwzględniając we wstępnej analizie wpływ prędkości kątowej wirnika, a następnie wyznaczając wartości sił aerodynamicznych dla takiego układu, rzeczywiste odkształcenia łopat są mniejsze – można mówić o efekcie usztywnienia łopat.
- Przy niższych prędkościach wiatru wierzchołek wieży oraz końce łopat przemieszczają się w przeciwną stronę niż wieje wiatr, siły bezwładności są większe od normalnych sił aerodynamicznych,
- Powyżej pewnej prędkości wiatru przemieszczenie łopaty jest w stronę, w którą wieje wiatr, normalne siły aerodynamiczne przeważają nad składowymi siłami bezwładności,

## LITERATURA

1. Jureczko M., Pawlak M., Mężyk A.: Optimisation of wind turbine blades, *Journal of Materials Processing Tech.*, Elsevier Science, Volume:167, Issue:: 2-3, August 30, 2005, p.463-471
2. Leishman Gordon J.: Challenges in Modeling the Unsteady Aerodynamics of Wind Turbines, American Institute of Aeronautics and Astronautics PAPER AIAA 2002-0037
3. Raymond L. Bisplinghoff, Holt Ashley, Robert L. Halfman: *Aeroelasticity*, Dover Publications INC, New York August 1996.
4. Pawlak M.: Aerodynamic forces and Horizontal Axis Wind Turbines, 6th International Scientific Conference, Applied Mechanics 2004, Slovakia
5. Hansen Martin O.L.: *Aerodynamics of Wind Turbines*. James&James Ltd, 2000.
6. Schaffarczyk A.P. , Pawlak M. , Richert F.: A New Model for Determining the Turbulence Intensity in the Wake of Wind Turbines, 6<sup>th</sup> German wind energy Conference DEWEK 2002, October 2002, Wilhelmshaven, Germany
7. Spera David A. : *Wind Turbine Technology, Fundamental Concepts in Wind Turbine Engineering*, ASME Press, New York 1998.
8. MSC Nastran 2005 Quick Reference Guide

## **INTERACTION BETWEEN AERODYNAMIC AND STRUCTURAL MODEL OF WIND TURBINE**

Abstract: When the wind is blowing, aerodynamic loads cause deflection of blades. This effect should be taken into account in aerodynamic model and new aerodynamic loads and deflection of blades adequate for those forces are calculated. Procedures are repeated iteratively to the moment of equilibrium. The influence of blades deflection in aerodynamic model is relatively low in small wind turbines, often neglected in commercial software used in analysis of modern wind turbines where length of blades is above 30 meters. In this article are compared two cases of static analysis, in first one the effect of blade deflection in aerodynamic model is neglected, in second analysis deflection of blades is considered.