

Badania wstępne turbiny wiatrowej w konfiguracji pionowej w tunelu aerodynamicznym oraz obliczenia przy użyciu metody DMS

Streszczenie. Artykuł przedstawia proces przeprowadzenia badania wstępnego turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu w tunelu aerodynamicznym. Badania przeprowadzono dla dwóch przykładowych kątów nastawienia łopaty. Badania te zrealizowane były w tunelu aerodynamicznym na Politechnice Rzeszowskiej. Dodatkowo wykonano analizę metodą DMS (teoria podwójnej wielokrotnej strugi) turbiny wiatrowej prezentowanej na targach ENERGETICS w Lublinie w celu porównania wyników eksperymentalnych dokonanych w tunelu aerodynamicznym z modelem analitycznym DMS.

Abstract. This paper presents the preliminary test process of the vertical wind turbine test conducted in the wind tunnel. The tests were performed in the Politechnika Rzeszowska's wind tunnel for two cases of the pitch angle. Additionally, a DMS analysis was performed for the turbine presented at the Fair in Lublin in order to compare the experimental and test results. (The Preliminary Studies of the Wind Turbine with the Vertical Configuration in the Aerodynamic Tunnel and analytical DMS model).

Słowa kluczowe: turbiny wiatrowe, tunel aerodynamiczny, teoria podwójnej wielokrotnej strugi, pionowa oś obrotu
Keywords: wind turbine, wind tunnel, double multiple stream tube, vertical axis

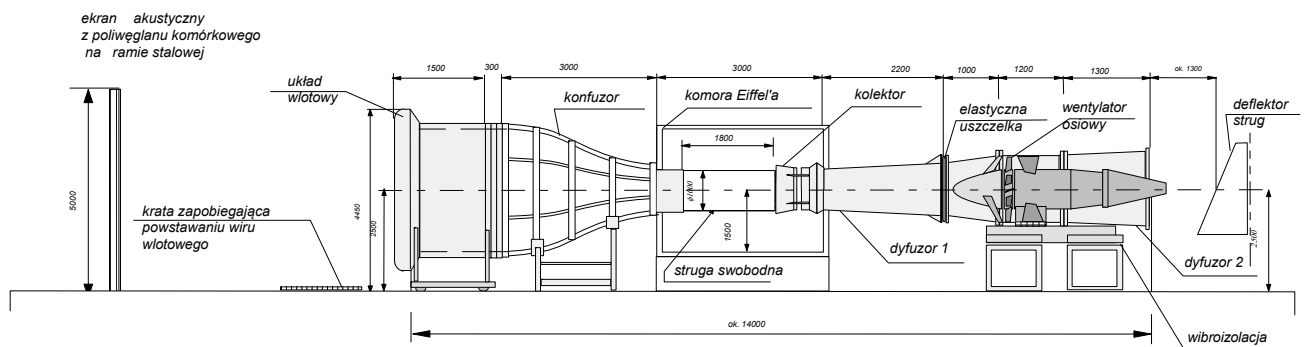
doi:10.12915/pe.2014.01.42

Wstęp

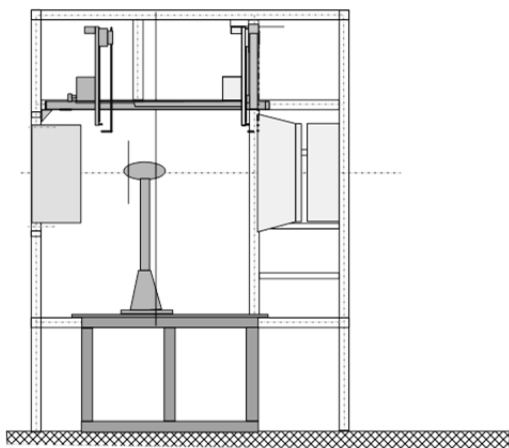
Badania wstępne turbiny pionowej zostały przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Aerodynamiki Katedry Termodynamiki i Mechaniki Płynów Politechniki Rzeszowskiej. Tunel o obiegu otwartym ze strugą swobodną TA1000 małej turbulencji przedstawia rysunek 1 [1].

(sklejka) na szkielecie z rur stalowych (rys. 3). Komora ma kształt sześciangu o boku ok. 3000 mm.

Przyjęty układ konstrukcyjny pozwala na zastosowanie modeli powodujących znacznie większe przesłonięcie przestrzeni pomiarowej niż w przypadku tuneli z przestrzenią zamkniętą. Dotyczy to zarówno blokowania tunelu modelem, jak i jego śladem aerodynamicznym.



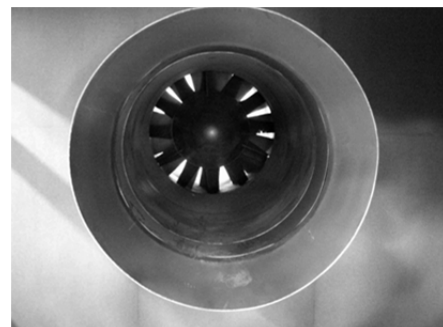
Rys. 1. Schemat tunelu aerodynamicznego TA1000



Rys. 2. Widok przestrzeni pomiarowej

Przestrzeń pomiarowa (rys. 2) została zaprojektowana w układzie ze strugą swobodną przepływającą przez hermetyczną komorę Eiffela o konstrukcji drewnianej

Cecha ta stanowi istotną zaletę przy badaniach brył nie opływowych, jak również kół wirnikowych (np. śmigła, wiatraki). Istnieje tutaj również możliwość uzyskania pewnego odcinka przepływu bez poziomej składowej gradientu ciśnienia. W przypadku zamkniętej przestrzeni pomiarowej wymaga to stosowania ścianek o regulowanej zbieżności lub odsysania warstwy przyściennej.



Rys. 3. Widok z komory Eiffela w kierunku wentylatora napędowego przez stożek szczelinowego kolektora wlotowego i dyfuzor

Do przemieszczania sond pomiarowych różnych typów przeznaczony jest trójwspółrzędny manipulator (rys. 4).



Rys. 4. Manipulator trójosiowy do sond zamontowany w komorze Eiffela

W skład wyposażenia pomiarowego tunelu wchodzi [2]:

- komputerowy system pomiarowy, w wersji modułowej, złożony z modułu głównego DaBook2001 o częstotliwości próbkowania 200 kHz,
- moduły rozszerzeń dbk 41 z wieloma kartami pomiarowymi, dający możliwość pomiaru maksymalnie do 512 punktów pomiarowych, w tym Dbk80, Dbk16, Dbk7,
- komputerowy system pomiarowy z szybkim próbkowaniem 1 MHz w wersji rozproszonej, Personaldaq3000,
- system termooanemometryczny do pomiaru prędkości przepływu i turbulencji, wyposażony w sondy jednokierunkowe i wielokierunkowe,
- 128-punktowy skaner ciśnienia różnicowego typu równoległego,
- 10 manometrów ciśnień różnicowych,
- 2 aerodynamiczne wagi tensometryczne:
 - zewnętrzna pięcioskładowa, zewnętrzna trójskładnikowa,
 - wewnętrzna (kadłubowa) sześćskładowa,
- zestaw wielootworowych sond pneumatycznych do pomiaru średnich wartości wektora prędkości i ciśnienia,
- szybkie sondy spiętrzające z sygnałem napięciowym na wyjściu,
- tachometry laserowe do pomiaru prędkości obrotowych na odległość,
- analizator drgań i dźwięku SVAN958,
- anemometr wiatraczkowy UAS.

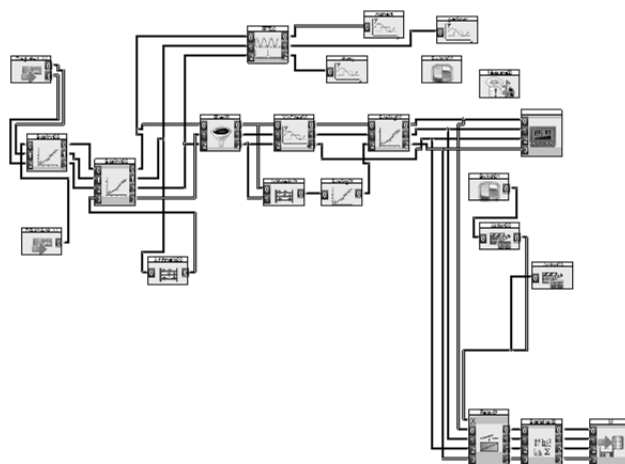
Opis stanowiska badawczego

Turbina została zainstalowana na stanowisku pomiarowym wyposażonym:

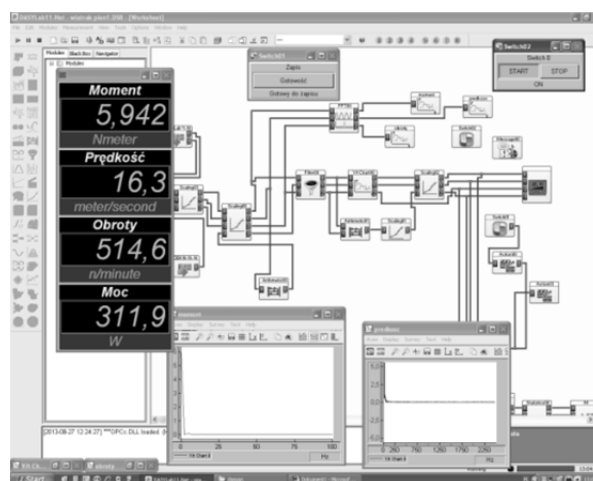
- w hamulec magnetyczny obciążający sterowany z zewnątrz,
- w dynamometr tensometryczny mierzący rzeczywisty moment na wale turbiny,
- w czujnik prędkości obrotowej wału,
- w rurkę Prandtla do pomiaru ciśnienia dynamicznego odwzorowującego prędkość przepływu powietrza,
- w czujnik wilgotności powietrza,
- w czujnik temperatury powietrza,
- w czujnik ciśnienia otoczenia.

Wszystkie sygnały pomiarowe są doprowadzone do systemu pomiarowego, czyli do kart DaqBook2001. Całość procesu jest zaprogramowana i sterowana z wykorzystaniem oprogramowania pomiarowego DasyLab v11. Cały eksperyment jest dzięki temu zautomatyzowany.

Na rysunku 5 przedstawiono diagram pomiarowy realizujący proces pomiaru w czasie badań. Złożony jest z modułów sterujących systemem, modułów filtracyjnych, matematycznych, dokonujących przeliczenia z ciśnienia dynamicznego na prędkość przepływu powietrza, modułów wyznaczających moc na podstawie zmierzonego momentu oraz prędkości wirowania turbiny. Dodatkowo zastosowano moduł statystyczny określający średnią wartość z 2048 próbek dla każdego pomiaru. Każdy pomiar jest rejestrowany przez zastosowany moduł dyskowy. Niezależnie od tego użyte zostały narzędzia wirtualne typu oscyloskop w celu obserwacji w trybie bezpośrednim rzeczywistych zmienności sygnałów pomiarowych. Zastosowano także moduł FFT, czyli szybkiej transformaty Fouriera dla wielkości mierzonych, celem określenia widma składowych dynamicznych parametrów mierzonych.



Rys. 5. Diagram pomiarowy w DasyLab



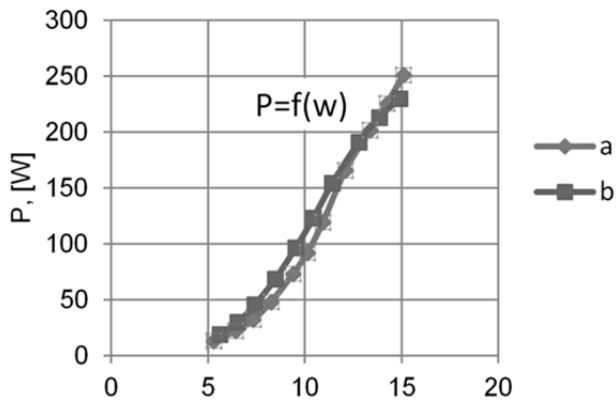
Rys. 6. Zrzuty z dwóch wybranych momentów badań dla prędkości powyżej 15 m/s

Procedura badawcza

Ponieważ przeprowadzone badania były badaniami wstępnymi do badań zasadniczych – dokładniejszych, pomiary dokonano w zakresie prędkości 0-15 m/s z rozdzielczością ok. 1 m/s.

Prędkość rozruchowa wynosiła ok. 5 m/s. W warunkach rzeczywistych będzie znacznie mniejsza, gdyż powiew wiatru w warunkach naturalnych ma charakter porywisty, ze znacznie większym współczynnikiem turbulencji niż w tunelu. Do tego typu pomiaru należy zastosować turbulizatory. Poza tym kąty nastawienia łopaty są ustawione do badań w sposób mało dokładny.

Po każdej ustawionej prędkości przepływu (rys. 6) zwiększano obciążenie za pomocą hamulca magnetycznego sterowanego w trybie wolnym, do momentu uzyskania maksymalnej mocy generowanej na turbinie (rys. 7). Następnie wynik ten był rejestrowany. Cały proces przebiega wolno, w celu wyeliminowania udziału energii gromadzonej w postaci momentu bezwładności turbiny. Badaną turbinę przedstawia rysunek 8.



Rys. 7. Wykres zależności mocy generowanej od prędkości nadmuchu dla dwóch różnych kątów nastawienia łopaty

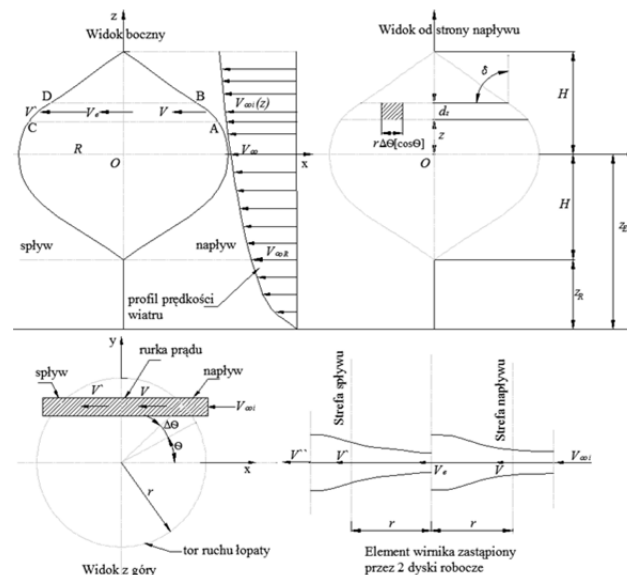


Rys. 8. Badana turbina o osi pionowej w komorze aerodynamicznej

Obliczenia przy użyciu metody DMS

Sprawność oraz efektywność działania elektrowni wiatrowej w znacznym stopniu zależą od zastosowanej turbiny. Dlatego też powstało wiele matematycznych modeli turbin, o różnym stopniu złożoności. Modele takie wykorzystuje się do symulowania pracy turbin, a także określania warunków współpracy turbiny z innymi urządzeniami elektrowni. Modelowanie turbiny należy rozpatrywać łącznie z modelowaniem wiatru. Wiatr wytwarza siły działające na wirnik turbiny, a ruch turbiny powoduje zawirowania przepływającego powietrza [3, 4]. Teorią powszechnie stosowaną do wyznaczania sił aerodynamicznych działających na elementy łopaty turbiny wiatrowej jest teoria strumieniowa elementu łopaty (ang. Blade Element Momentum Theory – BEM). Została ona wprowadzona przez H. Glauerta w 1935 r. [5]. Metoda obliczania charakterystyk aerodynamicznych podana przez

Glauerta jest połączeniem znanej teorii elementu łopaty oraz teorii strumienia śmigłowego [6, 7, 8]. Model DMS (teoria podwójnej wielokrotnej strugi) [9] został opracowany przez Iona Paraschivoiu do wykonywania analiz wirników Darrieusa. W gruncie rzeczy wywodzi się z teorii strumienia śmigłowego oraz teorii elementu łopaty. Model DMS dotyczy kołowej ścieżki łopaty oraz uzyskania energii w dwóch krokach (napływowym i spływowym względem osi obrotu). Model ten został w uproszczony sposób przedstawiony i opisany na rysunku 9.



Rys. 9. Definicja geometrii wirnika VAWT oraz dwa dyski w tandemie [9]

Istnieje pięć ważnych prędkości w obliczeniach DMS (rys. 9):

- prędkość niezakłóconego napływu wiatru V_{∞} ,
- prędkość napływowa wzbudzona V – z powodu uzyskania energii z łopatki w napływowej połowie wirnika,
- prędkość równowagi V_e na płaszczyźnie pomiędzy napływową i spływową połową wirnika (przedstawia prędkość śladu dysku napływowego wirnika oraz prędkość napływu wiatru spływowego dysku wirnika),
- prędkość spływowa wzbudzona V' – z powodu uzyskania energii z łopatki w spływowej połowie wirnika,
- prędkość śladu V'' całego podwójnego dysku.

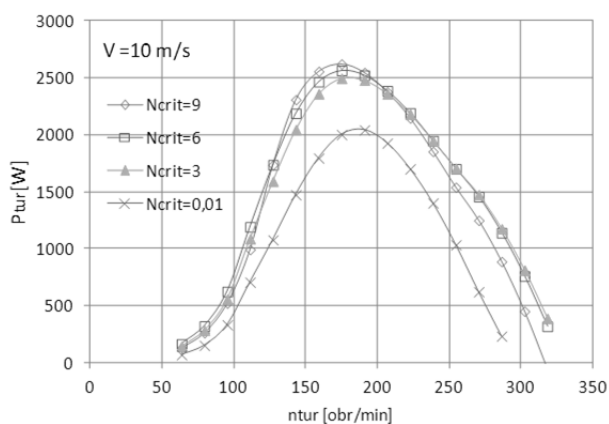
Dla łopat turbiny wiatrowej zastosowano zmodyfikowany profil DU 06-W-200, który został stworzony w Delft University. Do obliczeń turbiny metodą DMS potrzebna jest znajomość charakterystyk aerodynamicznych badanego profilu. Obliczenia te przeprowadzono przy użyciu oprogramowania XFOIL. Analiza ta została zrealizowana dla różnych wartości punktu przejścia. Punkt przejścia może zostać przewidziany umiarkowanie dokładnie przy użyciu kryteriów e^n , gdzie n , albo N_{crit} , jest czynnikiem wzmocnienia najbardziej wzmocnionej częstotliwości, która wywołuje przejście [11, 10]. Zalecana wartość standardowa dla N_{crit} wynosi zwykle 9, dla czystego przejścia 10-11, natomiast dla zaburzonego 4-6. Wykorzystując metodę DMS sporządzono charakterystyki mocy oraz momentu generowanego przez turbinę wiatrową dla różnych kryteriów przejścia przy stałej prędkości wiatru, wynoszącej 10 m/s, co przedstawiono na rysunku 11 i 12. Wymiary geometryczne badanej turbiny metodą DMS zebrano w tabeli 1. Rzeczywisty model turbiny zaprezentowany na targach ENERGETICS w Lublinie w 2012 r., co przedstawiono na rysunku 10.

Tabela 1. Założenia obliczeniowe turbiny wiatrowej dla metody DMS

Rodzaj profilu	–	DU 06-W-200_MOD	–
Długość cięciwy profilu	c	0,3	[m]
Liczba łopaty	N	3	–
Średnica wirnika	D_w	3	[m]
Wysokość łopaty	H	3	[m]
Powierzchnia	A	9	[m ²]



Rys. 10. Widok małej elektrowni VAWT



Rys. 11. Moc generowana przez turbinę wiatrową w funkcji prędkości obrotowej dla przy prędkości napływu 10 m/s dla różnych wartości Ncrit

Wnioski

W przypadku turbin wiatrowych wyraźnie widać, że Ncrit równe 9 jest wartością zawyżoną. Dlatego niższa wartość Ncrit dokładniej zamodeluje rzeczywisty proces. Analiza wszystkich czterech przykładów może być jednak interesująca, gdy porównuje się wyniki DMS z danymi eksperymentalnymi wykonanymi w tunelu aerodynamicznym. W związku z tym że przestrzeń w tunelu jest ograniczona, wysokość łopat oraz średnica wirnika została zmniejszona. Turbina którą analizowano metodą

analityczną DMS posiadała powierzchnię wynoszącą 9m² natomiast turbina badana w tunelu posiadała około powierzchnię 1 m². Turbina w tunelu aerodynamicznym była 9 krotnie mniejsza. Moc jaką osiągnęliśmy dla turbiny w tunelu aerodynamicznym wynosiła około 130 W przy prędkości 10 m/s. Natomiast przy obliczeniach analitycznych turbina o powierzchni 9 m² osiągnęła moc około 2000 W. Jeśli byśmy maksymalną moc turbiny badanej w tunelu przy tej samej prędkości wiatru pomnożyli przez 9 otrzymamy 1170 W. W celu dokładniejszego pomiaru należało by zbadać turbinę o podobnej powierzchni omiatania w tunelu aerodynamicznym oraz metodami analitycznymi.

LITERATURA

- [1] Strzelczyk P., Szczerba Z., Węsierski Ł., Tunel aerodynamiczny do badań śmigieł i turbin wiatrowch, *Pneumatyka* (2007)
- [2] Strzelczyk P., Szczerba Z., Turbiny wiatrowe o pionowej osi obrotu, *Pneumatyka* (2011)
- [3] Korolewski B., Uracz P., Modelowanie turbiny wiatrowej z wykorzystaniem charakterystyk współczynnika mocy, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, nr 59, seria: Studia i Materiały, nr 26 (2006)
- [4] Korolewski B., Uracz P., Modelowanie turbiny wiatrowej z wykorzystaniem teorii elementu płata, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, nr 59, seria: Studia i Materiały, nr 26 (2006)
- [5] Glauert H., Aerodynamic theory. Airplane Propellers, Springer (1935), 169-360
- [6] Gomułka S., Knap T., Strzelczyk P., Szczerba Z., Energetyka wiatrowa. Uszczelnianie, Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków (2006)
- [7] Hansen M.O.L., Aerodynamics of Wind Turbines, 2nd edition, Earthscan Publications (2008)
- [8] Mróz A., Adaptacyjna absorpcja obciążeń od ekstremalnych podmuchów wiatru w turbinach wiatrowych, IPPT PAN, Warszawa (2012)
- [9] Paraschivoiu I., Wind Turbine Design – With Emphasis on Darrieus Concept, Presses Internationales Polytechnique, Canada (2002)
- [10] Schlichting H., Gersten K., Boundary Layer Theory, 8th edition, Springer (1999)
- [11] Bertin J.J., Aerodynamics for Engineers, 4th edition, Prentice Hall (1994)

Autorzy:

dr inż. Damian Mazur, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, B206, 35-959 Rzeszów, e-mail: mazur@prz.edu.pl

dr inż. Zygmunt Szczerba, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Al. Powstańców Warszawy 8, pok.3A bud L31, 35-959 Rzeszów, e-mail: zygszcze@prz.edu.pl