

BADANIE CHARAKTERYSTYK TURBINY WIATROWEJ

Mariusz ADAMSKI*, Piotr BARA*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Celem badań było wyznaczenie podstawowych charakterystyk modelowej turbiny wiatrowej, do których należą charakterystyka mocy turbiny w funkcji prędkości strumienia przepływającego powietrza oraz charakterystyka mocy turbiny dla różnych kątów nachylenia łopatek wirnika. Dodatkowo wyznaczone zostały zależności prędkości obrotowej turbiny od prędkości strumienia przepływającego powietrza przy stałym kącie nachylenia łopatek turbiny, a także prędkości obrotowej turbiny od kąta nachylenia łopatek przy stałej prędkości przepływającego powietrza. Pomiarów wykonano w tunelu aerodynamicznym w Laboratorium Odnawialnych Źródeł Energii Politechniki Białostockiej.

Słowa kluczowe: energia odnawialna, energia wiatru, turbiny wiatrowe.

1. Zasoby energii wiatru w Polsce

Energetyka wiatrowa jest najbardziej dynamicznie rozwijającym się sektorem energetyki odnawialnej zarówno w Europie, jak i na świecie. Polska należy do krajów o korzystnych do rozwoju energetyki zasobach wiatru, porównywalnych do Niemiec (Soliński, 1999). Jednak jak dotychczas w Polsce zainstalowano moc jedynie około 300 MW, natomiast w Niemczech ponad 20 000 MW (Soliński i in., 2008).

Sporządzone przez specjalistów z UE ekspertyzy dotyczące ocen możliwości rozwoju energii uzyskiwanej z wiatru w Polsce wykazały, iż poziom mocy zainstalowanej w roku 2050 może osiągnąć nawet 5 000 MW (Korban, 2010). Do szybkiego rozwoju energetyki wiatrowej nie są przystosowane również przesyłowe sieci elektroenergetyczne (Napieraj i Stańczak, 2013). Stąd szczególnego znaczenia nabierają turbiny wiatrowe o niedużych mocach do około 10 kW pracujące na potrzeby poszczególnych gospodarstw domowych.

2. Turbiny wiatrowe

Turbina wiatrowa to urządzenie techniki wiatrowej służące do konwersji energii kinetycznej wiatru na pracę mechaniczną w postaci ruchu obrotowego wirnika. Według kryterium zasady działania można wyróżnić (Sorko i Teleszewski, 2014):

- maszyny rotodynamiczne,
- maszyny naporowe.

Dokonuje się też podziału urządzeń ze względu

na położenie osi wirnika względem kierunku strumienia powietrza (Tytko, 2009):

- turbiny o osi pionowej,
- turbiny o osi poziomej.

Praca turbin rotodynamicznych zachodzi dzięki występowaniu siły nośnej. Wierzchnia część strugi powietrznej opływająca górną powierzchnię skrzydła musi przebyć większą drogę niż dolna część. Wobec tego, opływające wierzchni płat powietrze porusza się szybciej, generując w ten sposób obszar obniżonego ciśnienia względem dolnej części płata. Różnica ciśnienia między dolną częścią skrzydła a górną pomnożona przez pole powierzchni jest siłą nośną (Sorko i Teleszewski, 2014). Wykorzystanie turbin wiatrowych do produkcji energii elektrycznej niesie szereg korzyści. Eksploatacja energii wiatru nie zanieczyszcza środowiska naturalnego, a jej zasoby są bezpłatne oraz powszechnie dostępne. Produkcja energii elektrycznej z energii wiatru redukuje ilość energii elektrycznej wytworzonej z jej konwencjonalnych źródeł. Przekłada się to między innymi na zmniejszenie zjawiska smogu czy występowania kwaśnych deszczy, a także redukcję efektu cieplarnianego (Boczar, 2008). Ponadto zaletą jest możliwość lokalizowania instalacji wiatrowych na obszarach uznawanych za nieużytki, jak pustynie, obszary skaliste czy wybrzeża (Gronowicz, 2010).

3. Badanie charakterystyk turbiny wiatrowej

W ramach przeprowadzonych laboratoryjnie badań wyznaczone zostały dwie charakterystyki modelowej turbiny wiatrowej o poziomej osi obrotu:

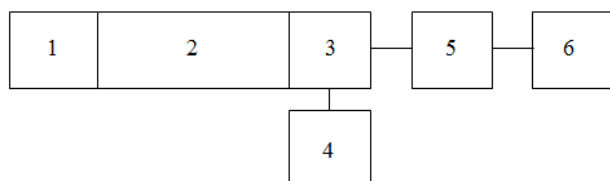
* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: mariusz.adamski@pb.edu.pl

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: p.bara@wp.pl

- charakterystyka mocy turbiny wiatrowej P w funkcji prędkości strumienia przepływającego powietrza v ,
- charakterystyka mocy turbiny wiatrowej P dla różnych kątów nachylenia łopat wirnika.

3.1. Stanowisko badawcze

Najistotniejszymi elementami stanowiska badawczego (rys. 1) są: zintegrowana konstrukcja tworzona przez wentylator (1), tunel aerodynamiczny wyposażony w rurkę Pitota (2), modelowa turbina wiatrowa (3) oraz jednostka INIT1 (4), a także jednostka sterująca (5) i komputer (6).



Rys. 1. Schemat powiązań poszczególnych elementów stanowiska badawczego, gdzie: 1 – wentylator, 2 – tunel aerodynamiczny z rurką Pitota, 3 – modelowa turbina wiatrowa, 4 – jednostka INIT1, 5 – jednostka sterująca, 6 – komputer

3.2. Wyznaczenie charakterystyki mocy turbiny w funkcji prędkości wiatru

Charakterystyka mocy turbiny wiatrowej w funkcji prędkości wiatru to jedna z ważniejszych charakterystyk elektrowni wiatrowych. Do jej wyznaczenia w tunelu aerodynamicznym przyjęto stały kąt nachylenia łopat wirnika względem osi strumienia napływającego powietrza, wynoszący 60° . W ramach przeprowadzonego eksperymentu wyznaczona została także zależność prędkości obrotowej turbiny od prędkości strumienia powietrza.

3.3. Prezentacja i analiza wyników

Przedstawione poniżej wielkości wyznaczono z następujących wzorów:

- moc modelowej turbiny wiatrowej (Osowski i Szabatin, 1992):

$$P = U \cdot I \text{ [W]} \quad (1)$$

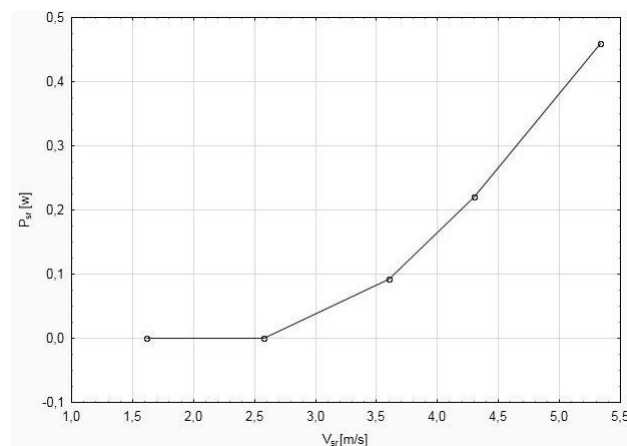
gdzie: U jest napięciem w V, a I jest natężeniem prądu w A.

Uzyskane wyniki pomiarów zaprezentowano w tabeli 1 oraz na rysunkach 2 i 3.

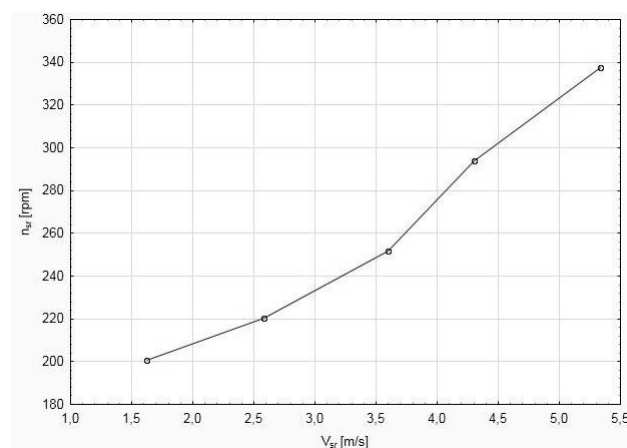
Na wykresie charakterystyki $P=f(v)$ (rys. 2) widać, że moc modelowej turbiny wyraźnie wzrasta wraz ze wzrostem prędkości zadanego strumienia powietrza. W badanym zakresie prędkości zadanego strumienia powietrza, to jest 1,62-5,34 m/s osiągnięte zostało maksimum dla $P_{(5,34)} = 0,46$ W. Niższe zadane prędkości strumienia powietrza mieszczące się w zakresie 1,62-2,58 m/s skutkowały brakiem napięcia elektrycznego. Należy stwierdzić, że w warunkach przeprowadzanego doświadczenia nie została ustalona maksymalna moc badanej turbiny oraz optymalna

Tab. 1. Zestawienie pomiarów oraz wyników obliczeń

kąt nachylenia łopaty do osi turbiny $\alpha = 60^\circ$					
$n_{wentiMAX}$ %	V_{sr} m/s	n_{sr} obr/min	U_{sr} V	I_{sr} A	P_{sr} W
10	1,62	200,8	0	0,11	0
20	2,58	220,4	0	0,13	0
30	3,60	251,8	0,62	0,15	0,093
50	4,30	294,0	1,30	0,17	0,221
70	5,34	337,6	2,42	0,19	0,460



Rys. 2. Charakterystyka mocy turbiny P w funkcji prędkości strumienia powietrza v



Rys. 3. Charakterystyka prędkości obrotowej turbiny n w funkcji prędkości strumienia powietrza v

prędkość strumienia powietrza. Należy rozszerzyć zakres zadanego prędkości strumienia powietrza i wyznaczyć charakterystyczny punkt przegięcia krzywej, po przekroczeniu którego moc turbiny pozostaje na maksymalnym poziomie i nie zmienia się mimo wzrostu prędkości strumienia powietrza. Zaobserwowaną zależność mocy turbiny $P = f(v)$ można wyrazić równaniem:

$$P = 0,0366v^2 - 0,2056v + 0,0689; R^2 = 0,9981 \quad (2)$$

Prędkość obrotowa turbiny wzrasta wraz z wzrostem prędkości strumienia powietrza. Dla zakresu prędkości przepływu powietrza 1,62-5,34 m/s liczba obrotów wirnika mieściła się w przedziale 200,8-337,6 rpm (rys. 3). Ciągły wzrost prędkości obrotowej wywołany wzrostem prędkości przepływającego strumienia powietrza świadczy, iż nie zostały przekroczone wartości krytyczne. Zależność prędkości obrotowej $n = f(v)$ opisuje równanie:

$$n = 4,2v^2 + 9,52v + 186,16; R^2 = 0,999 \quad (3)$$

4. Wyznaczenie charakterystyki mocy turbiny dla różnych kątów nachylenia łopatek wirnika

Zmiana kąta nachylenia łopatek wirnika (kąta natarcia) powoduje zmianę siły nośnej profilu. Odchylenie płata turbiny do tyłu powoduje zwiększenie kąta natarcia, co skutkuje wzrostem prędkości strumienia powietrza opływającego górną część profilu oraz zwiększeniem siły nośnej. Po przekroczeniu wartości kąta krytycznego obserwuje się oderwanie strugi powietrza na górnej części profilu, co powoduje zanik siły nośnej. Zjawisko to nosi nazwę „przeciągnięcia”.

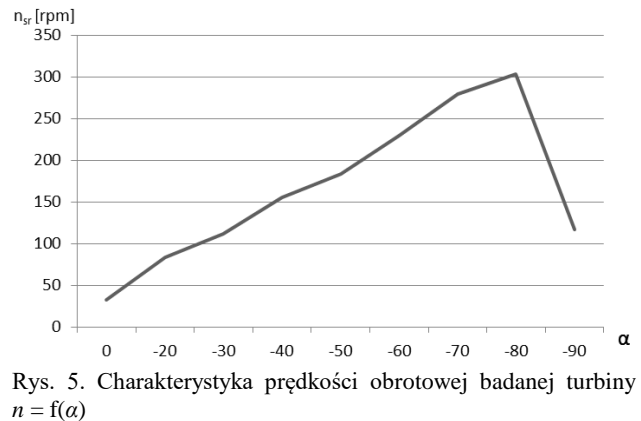
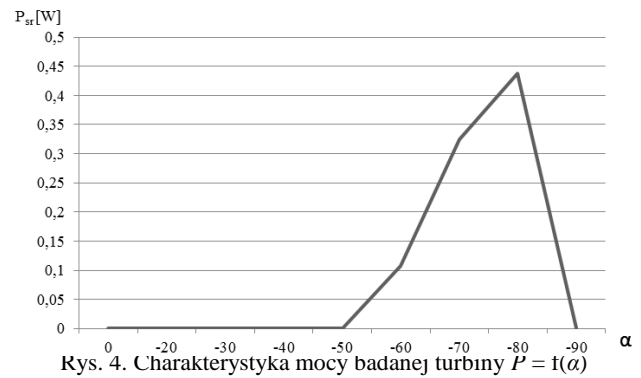
Charakterystyka mocy modelowej turbiny wiatrowej w funkcji kąta natarcia oraz zależność prędkości obrotowej turbiny od kąta natarcia zostały wyznaczone na podstawie pomiarów przeprowadzonych w tunelu aerodynamicznym przy stałej nastawie (30%) prędkości strumienia powietrza oraz zmiennej wartości kąta natarcia strumienia powietrza (tab. 2). Prędkość strumienia powietrza wynosiła około 3,3 m/s.

Tab. 2. Zestawienie pomiarów oraz wyników obliczeń

α st	V_{sr} m/s	n_{sr} obr/min	U_{sr} V	I_{sr} A	P_{sr} W
0	3,4	32,8	0	0	0
-20	3,3	83,4	0	0	0
-30	3,3	112,0	0	0	0
-40	3,2	155,0	0	0,06	0
-50	3,4	183,8	0	0,12	0
-60	3,3	229,6	0,72	0,15	0,108
-70	3,2	279,4	1,80	0,18	0,324
-80	3,2	302,8	2,30	0,19	0,437
-90	3,2	117,2	0,0	0,03	0

4.1. Prezentacja i analiza wyników

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wielkości charakterystycznych wyznaczone zostały charakterystyki $P = f(\alpha)$ (rys. 4) oraz $n = f(\alpha)$ (rys. 5). Do obliczeń użyto wzoru (1).



W przeprowadzonym doświadczeniu turbina wiatrowa uzyskała największą moc dla kąta $\alpha = (-80^\circ)$ wynoszącą $P_{(-80^\circ)} = 0,437$ W, a pierwszy dodatni odczyt mocy turbiny P uzyskano przy kącie natarcia $\alpha = (-60^\circ)$. Skutkiem zmiany kąta natarcia jest wzrost szybkości strumienia powietrza na górnej części profilu i zwiększenie siły nośnej. Kąt $\alpha = (-80^\circ)$ należy uznać za kąt krytyczny, po przekroczeniu którego obserwuje się zanik siły nośnej spowodowany odrywaniem strug powietrza na górnej części łopatki wirnika.

Stopniowa zmiana kąta nachylenia łopatek w zakresie kątów α 0° - (-80°) skutkowałą wzrostem prędkości obrotowej od 32,8 do 117,2 rpm (rys. 5). Zmiana kąta natarcia wywoływała wzrost wartości siły nośnej, aż do momentu przekroczenia wartości kąta krytycznego $\alpha = (-80^\circ)$, po którym nastąpiło opisanie wyżej zjawisko „przeciągnięcia”.

5. Podsumowanie

Moc turbiny wiatrowej wzrasta wraz ze wzrostem prędkości strumienia powietrza i w badanym przypadku wyrażona jest równaniem (2).

Potrzebna jest pewna minimalna prędkość strumienia przepływającego powietrza, aby możliwe było odnotowanie napięcia w układzie, w doświadczeniu – $U = 0,62$ V dla $v = 3,6$ m/s.

Prędkość obrotowa wirnika wzrasta wraz ze wzrostem prędkości strumienia powietrza i dla analizowanego przypadku może być wyrażona równaniem (3).

Moc oraz prędkość obrotowa turbiny wiatrowej zależne są od kąta natarcia α . Wzrost odchylenia profilu

do tyłu skutkuje wzrostem siły nośnej uzyskanym dzięki wzrostowi prędkości strumienia powietrza na górnej części profilu.

Wzrost siły nośnej przekłada się na zwiększenie uzyskanej mocy badanej turbiny do momentu przekroczenia wartości krytycznej kąta natarcia, gdzie charakterystyki mocy turbiny i prędkości obrotowej turbiny ulegają gwałtownemu załamaniu.

Literatura

- Boczar T. (2008). Energetyka wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania. *Wydawnictwo Pomiar Automatyka Kontrola*, Warszawa.
- Gronowicz J. (2010). Niekonwencjonalne źródła energii. *Wydawnictwo Technologii Eksploatacji – PIB*, Radom-Poznań.
- Korban Z. (2010). Wybrane aspekty wykorzystania energetyki wiatrowej w Polsce., *Górnictwo i Geologia*, Tom 5, Zeszyt 2, 79-90.
- Napieraj K., Stańczak M. (2013). Zalety i bariery rozwoju energetyki wiatrowej. *Ekologia i Technika*, R. 21, Nr 5, 215-221.
- Osiowski J., Szabatin J. (1992). Podstawy teorii obwodów, t. 1. *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, Warszawa.
- Sorko A.S., Teleszewski J.T. (2014). Modelowanie parametrów aerodynamicznych urządzeń energetyki wiatrowej. I. Aerodynamiczna analiza profili wirników turbin i rotorów wiatrowych, *Symulacja w badaniach i rozwoju*, Vol. 5, Nr 1, 43-55.

Soliński I. (1999). Energetyczne i ekonomiczne aspekty wykorzystania energii wiatrowej. *Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami i Energią PAN*, Kraków.

Soliński I., Soliński B., Solińska M. (2008). Rola i znaczenie energetyki wiatrowej w sektorze energetyki odnawialnej. *Polityka Energetyczna*, t. 11, Zeszyt 1, 451-464.

Tytko R. (2009). Odnawialne źródła energii. *OWG*, Warszawa.

RESEARCH ON THE CHARACTERISTICS OF THE WIND TUBINE

Abstract: The paper concerns the topic of using wind turbines to produce electricity. Main attention was focused on showing the method of researching the basic characteristics of the model wind turbine: power characteristic as a power of the device to the wind speed ratio and power characteristic as a power of the device to the inclination of blade angle ratio. In addition, some dependencies have been defined: dependence of rotational speed of the wind turbine on a speed of flowing air, and dependence of rotational speed of the wind turbine on an inclination of the blade angle. The measurements required for this purpose were carried out in an aerodynamic tunnel at the Laboratory of Renewable Energy Sources of the Białystok University of Technology.

Opracowanie wykonano w ramach pracy statutowej S/WBiŚ/4/14 Katedry Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa i Wentylacji Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej i sfinansowano ze środków na naukę MNiSW.