

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Klasyfikacja i charakterystyka turbin wiatrowych (silników wiatrowych)

KRZYSZTOF GARBALA¹, ANIELA MARLENA TOKAJUK², KAMIL KAŁŁAUR³, PIOTR CYBULKO⁴

¹AC S.A. BIAŁYSTOK, INSTYTUT INŻYNIERII LASEROWEJ BIELSKO-BIAŁA,

²INSTYTUT INŻYNIERII LASEROWEJ BIELSKO-BIAŁA, ³CYNKOMET Sp. z o.o., ⁴AC S.A. BIAŁYSTOK

Słowa kluczowe: współczynnik mocy turbin wiatrowych, podział turbin wiatrowych, kinematyka turbiny wiatrowej

STRESZCZENIE:

W pracy przedstawiono algorytm matematyczny powiązania wektora prędkości wiatru z mocą wiatrową turbiny wiatrowej (silnika wiatrowego) oraz jej sprawnością. Omówiono podział konstrukcyjny silników wiatrowych i przedstawiono ich sprawność. Dokonano również podziału turbin wiatrowych w stosunku do ich mocy i podano zastosowanie dla poszczególnych przedziałów mocy.

Classification and characteristics of wind turbines (wind engines)

Keywords: power factor of wind turbines, classification of wind turbines, wind turbine kinematics

ABSTRACT:

The document presents an algorithm for linking the wind speed vector with the wind turbine's (wind engine's) power output and efficiency. Different wind engine structures and their efficiency have been discussed. Wind turbines have also been divided according to their power output, and use cases for individual power ranges presented.

1. WSTĘP

Energia wiatrowa towarzyszy człowiekowi od początku rozwoju cywilizacji aż do czasów obecnych, będąc najwcześniej eksploatowaną przez ludzi energią odnawialną, obok spalania drewna. Na początku zaprzęgnięto energię wiatru do napędu statków i łodzi. Pierwsze wzmianki o żaglowcach pochodzą ze starożytnego Egiptu – na Nilu wykorzystywano je do transportu bloków kamiennych przy budowie piramid [1, 2]. Jednak najpoważniejszą innowacją wśród europejskich urządzeń napędowych był wiatrak.

Pochodzenie europejskiego wiatraka stanowi jeszcze jedną tajemnicę. Początkowo wiatraki były wykorzystywane przez człowieka do mieleńia ziarna oraz pompowania wody. Pierwszy opis ich użycia do pompowania wody powstał około 400 r. p.n.e. w Indiach i Persji [2, 3]. W I wieku n.e. Heron z Aleksandrii zaproponował napędzanie organów wodnych za pomocą małego wiatraka. Wiatraczek Herona obracał się na osi poziomej. Dziewięć wieków po turbinie Herona w Seistanie istniały już młyny obracane przez wiatr, co potwierdza relacja geografa i historyka arabskiego al-Masudiego z 947 r.: „Seistan jest krainą wiatru i piasku”. W czasach nam współczesnych, a zwłaszcza w ostatnich dwóch dekadach, nastąpił gwałtowny rozwój technologii wykorzystującej wiatr jako źródło energii, porównywalny nawet z informatyzacją. Do głosu doszły tutaj czynniki ekologiczne związane z emisją CO₂, a także ekonomiczne.

Urządzeniem, które zamienia energię wiatru w energię mechaniczną w każdej elektrowni wiatrowej, jest turbina wiatrowa, nazywana też silnikiem wiatrowym. Jednym z podstawowych parametrów charakteryzujących turbinę wiatrową jest jej współczynnik mocy Cp, czyli stosunek mocy turbiny do całkowitej mocy zawartej w wietrze. Współczynnik mocy turbiny zależy od parametrów konstrukcyjnych, do których można zaliczyć liczbę płatów i ich profil. Współczynnik ten zależy również od prędkości obrotowej wirnika i chwilowej prędkości wiatru, a w turbinach o poziomej osi obrotu również od aktualnego kąta nastawienia płatów turbiny [4, 5].

Każdy typ turbiny wiatrowej charakteryzuje określony współczynnik Cp.

2. KINEMATYKA TURBINY WIATROWEJ (SILNIKA WIATROWEGO)

Wektor prędkości wiatru przed wirnikiem turbiny jest większy od prędkości wiatru za turbiną. Wynika z tego, że część energii w postaci strumienia powietrza uchodzi za wirnikiem turbiny. Gdybyśmy jednak chcieli odebrać 100% mocy zawartej w wietrze, prędkość odchodzącego powietrza musiałaby być równa zero. W rezultacie turbina nie oddawałaby żadnej energii. W drugim granicznym przypadku strumień powietrza mógłby nie zmieniać swej prędkości po kontakcie z turbiną. Również w tym przypadku odebrana moc równa byłaby zero.

Powietrze omywa turbinę w sposób pokazany na Rysunku 1. Ilość powietrza napływającego w ciągu sekundy z prędkością V_1 (z prawej strony) musi być równa ilości powietrza odpływającego z lewej strony ze zmniejszoną prędkością V_2 .

Ponieważ dla przepływającego gazu musi być zachowany warunek ciągłości strugi:

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2, \quad (1)$$

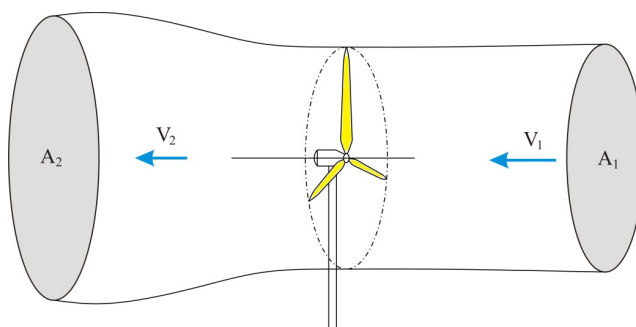
gdzie:

A_1 – powierzchnia zakreślana przez wirnik w m²

A_2 – powierzchnia strugi powietrza za wirnikiem w m²

V_1 – prędkość wiatru przed wirnikiem turbiny, m/s

V_2 – prędkość wiatru za wirnikiem turbiny, m/s,



Rysunek 1 Przepływ powietrza przez turbinę [4]

stąd powierzchnia A_2 musi być o tyle większa, o ile zmniejszyła się prędkość [5, 6].

Masa powietrza przepływająca przez wirnik w ciągu jednej sekundy:

$$m = \rho \cdot A_1 \cdot \frac{V_1 + V_2}{2}, \quad (2)$$

gdzie:

ρ – gęstość powietrza, kg/m³.

Moc odebrana z wiatru wynosi:

$$P_{ow} = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2}, \quad (3)$$

a po podstawieniu w miejsce m równania (2) otrzymujemy:

$$P_{ow} = \frac{\rho}{4} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2). \quad (4)$$

Moc zawarta w wietrze jest równa:

$$P_{zw} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1^3. \quad (5)$$

Stosunek mocy zawartej w wietrze do mocy, jaką możemy odebrać, wynosi:

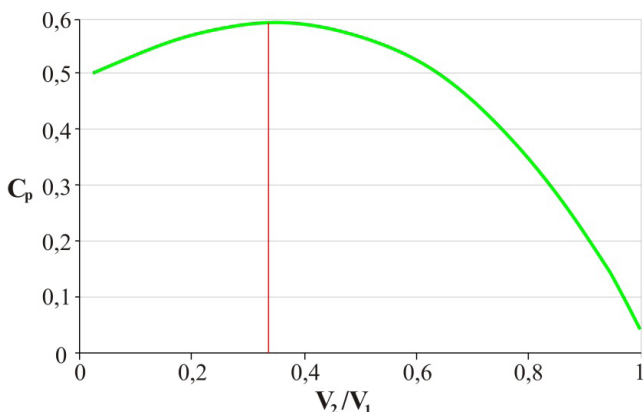
$$\frac{P_{ow}}{P_{zw}} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) = C_p. \quad (6)$$

Stosunek ten znany jest pod pojęciem współczynnika mocy Betza C_p . Współczynnik C_p po raz pierwszy określił Albert Betz w 1919 roku [4].

Badając funkcję Betza, można obliczyć, jaka musi być optymalna zmiana prędkości strumienia powietrza przepływającego przez wirnik turbiny wiatrowej, aby odebrać z energii wiatru jak największą ilość mocy. Wyliczając pochodną równania (6) po zmiennych V_2/V_1 i przyrównując ją do zera, otrzymuje się maksimum [4, 7]:

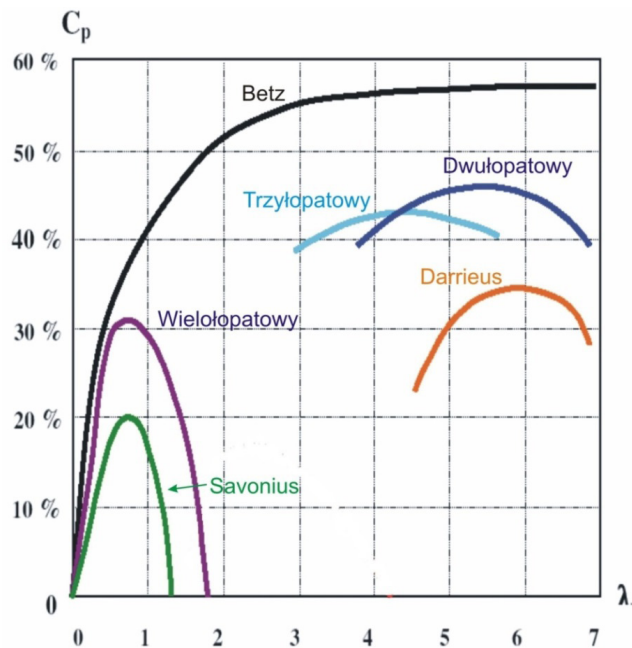
$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)_{opt} = \frac{1}{3}. \quad (7)$$

Największą moc uzyskuje się, gdy stosunek prędkości V_2 do V_1 jest równy $1/3$. Największa możliwa do uzyskania moc z wiatru to $16/27$ całkowitej mocy niesionej przez wiatr. Teoretycznie nie można uzyskać więcej niż $59,2\%$ z dostępnej mocy zawartej w strumieniu przepływającego powietrza. Rysunek 2 przedstawia przebieg zależności współczynnika Betza do stosunku prędkości V_2/V_1 . Jak widać, funkcja osiąga ekstremum w miejscu, gdzie stosunek ten wynosi $1/3$, a dla większych i mniejszych wartości przyjmuje wartości mniejsze.



Rysunek 2 Współczynnik mocy Betza C_p [4]

Współczynnik C_p w praktyce jest zwykle mniejszy, ponieważ teoria nie uwzględnia wszystkich czynników wpływających na pracę turbiny i wszystkich strat. Na Rysunku 3 przedstawiono przebieg współczynnika C_p w funkcji szybkobieżności λ dla danego typu turbiny. Energię wiatru najlepiej wykorzystuje turbina wiatrowa dwułopatowa o poziomej osi obrotu, bowiem jej sprawność aerodynamiczna C_p mieści się w granicach 46% . Najniższą sprawnością charakteryzuje się turbina Savoniusa o pionowej osi obrotu – wykorzystuje ona energię wiatru w około 20% [4, 6 i 7].



Rysunek 3 Zależność współczynnika mocy C_p od szybkobieżności λ turbin wiatrowych [6]

$$\lambda = \frac{0,5D \cdot \omega}{V_1}, \quad (8)$$

gdzie:

ω – prędkość kątowna wirnika turbiny
 D – średnica wirnika turbiny.

3. PODZIAŁ TURBIN WIATROWYCH POD WZGLĘDEM MOCY WYTWARZANEJ

Następnym parametrem charakteryzującym turbiny wiatrowe jest moc wytwarzana, która decyduje o zastosowaniu:

1. Mikroelektrownie wiatrowe – posiadają moc niższą niż 100 W. Wykorzystuje się je najczęściej do zasilania przez akumulatory przy oświetleniu poszczególnych pomieszczeń lub urządzeń w domu, a w ostatnich czasach również do zasilania infrastruktury drogowej i miejskiej.

2. Małe elektrownie wiatrowe – posiadają moc od 100 W do 50 kW. Elektrownie tego typu potrafią zapewnić energię elektryczną w pojedynczych gospodarstwach domowych lub nawet małych firmach. W ostatnich latach rośnie zapotrzebowanie rynku na urządzenia tego rodzaju.

3. Duże elektrownie wiatrowe (w praktyce powyżej 100 kW do 1 MW) oprócz tego, że mogą zasilać dom, stosowane są przede wszystkim do wytwarzania prądu, który sprzedaje się do sieci elektroenergetycznej.

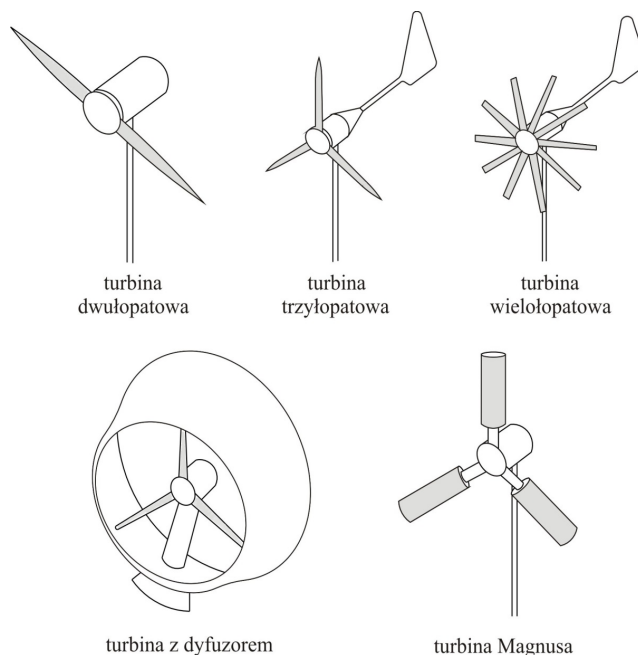
4. Max elektrownie wiatrowe – posiadają moc nominalną powyżej 1 MW. Głównym zastosowaniem jest przemysł energetyczny – tak zwane farmy wiatrowe, zlokalizowane zarówno na lądzie, jak i na morzu.

4. PODZIAŁ TURBIN WIATROWYCH (SILNIKÓW WIATROWYCH) POD WZGLĘDEM KONSTRUKCYJNYM

Czynnikiem konstrukcyjnym, który stanowi następny podział silników wiatrowych, jest oś obrotu wirnika lub rotora. Rozróżniamy turbiny wiatrowe o poziomej i pionowej osi obrotu. Powszechnie znane są turbiny wiatrowe o poziomej osi obrotu (*horizontal axis wind turbine*) (Rys. 4). Z tej grupy najbardziej rozpowszechnioną turbiną jest wirnik trzyłopatowy, stosowany w komercyjnych elektrowniach wiatrowych (farmy wiatrowe). Wykorzystuje on zakres prędkości wiatru od 4 do 25 m/s. Powyżej wartości maksymalnej wiatru taki wirnik jest wyłączany ze względów bezpieczeństwa konstrukcji (duże siły odśrodkowe mogłyby zniszczyć łopaty wirnika).

Wiatrak wielołopatowy był szeroko rozpowszechniony w Ameryce Północnej jako źródło napędu pomp wody. Charakteryzuje się on wykorzystywaniem małych podmuchów wiatru, jest wolnoobrotowy i posiada duży moment rozruchowy w porównaniu z wirnikiem trzyłopatowym. Do jego zalet należy zaliczyć cichą pracę.

Wirniki z dyfuzorem oraz wirniki wykorzystujące efekt Magnusa nie są szeroko rozpowszechnione; na świecie istnieje tylko kilka takich konstrukcji. Wszystkie turbiny o poziomej osi obrotu muszą być wyposażone w układ do nastawiania na wiatr, gdyż mogą działać tylko w przypadku, gdy wektor prędkości wiatru jest równoległy do osi obrotu wirnika turbiny [8, 9, 10].



Rysunek 4 Turbiny wiatrowe o poziomej osi obrotu (*horizontal axis wind turbine*) [8]

5. PODSUMOWANIE

Moc wytwarzana przez turbinę wiatrową jest uzależniona od prędkości wektora wiatru, co stanowi główny problem w prognozowaniu z tygodniowym wyprzedzeniem energii wytwarzanej przez farmy wiatrowe w celu zarządzania zapotrzebowaniem energetycznym w danym dniu. Nie przeszkadza to jednak w rozwoju tej gałęzi energetyki i zapotrzebowania rynku na energię pozyskiwaną z wiatru. Należy nadmienić, że istnieje wiele sposobów zastosowania mikroturbin wiatrowych np. w infrastrukturze drogowej, w połączeniu z panelami fotowoltaicznymi (te dwa źródła wytwarzania energii elektrycznej wzajemnie się uzupełniają); widuje się je też przy domkach letniskowych i na jachtach.

W ostatnich latach coraz więcej turbin wiatrowych powyżej 2 MW jest lokalizowanych w morzu, celem jak najlepszego wykorzystania energii wiatru. W takiej lokalizacji szorstkość terenu jest najkorzystniejsza (wektor prędkości wiatru jest równoległy do tafli powierzchni wody, nie jest zakłócany przeszkodami terenowymi i urbanistycznymi).

LITERATURA

- [1] Drachmann A. G., Heron's Windmill, Centaurus, 7 (1961), pp. 145÷151.
- [2] Smil V., Energies: An Illustrated Guide to the Biosphere and Civilization, MIT Press, 2000.
- [3] Lohrmann D., Von der östlichen zur westlichen Windmühle, Archiv für Kulturgeschichte, Vol. 77, Issue 1, 1995, pp. 1÷30.
- [4] Randall D. G., Betz A., Introduction to the Theory of Flow Machines, Oxford Pergamon Press, 1966.
- [5] Uracz P., Karolewski B., Modelowanie turbin wiatrowych z wykorzystaniem charakterystyk współczynnika mocy, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 59/2006.
- [6] Jagodziński W., Silniki wiatrowe, Warszawa, PWT, 1959.
- [7] McGowan J. G., Manwell J. F., Rogers A. L., Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons Inc., West Sussex, 2002.
- [8] Augustyn M., Ryś J., Kinematyka i moment napędowy turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu wirnika, Czasopismo Techniczne. Mechanika, R. 104, z. 1-M, 2008.
- [9] Hansen M. O. L., Aerodynamics of Wind Turbines: Rotors, Loads and Structure, James & James Ltd., London, 2000, ISBN 1-902916-06-9.
- [10] Bertagnolio F., Sorensen N., Johansen J., Fuglsang P., Wind Turbine Airfoil Catalogue, Riso National Laboratory, Roskilde, 2001, ISBN 87-550-2910-8.