

# Turbina wiatrowa VAWT – komputerowe badania symulacyjne

Waldemar Fedak, Wojciech Gancarski, Stanisław Anweiler, Adam Niesłony, Roman Ulbrich

## 1. Wprowadzenie

Podstawowym problemem w maksymalizacji wydajności turbiny wiatrowej jest kształt i wielkość łopaty wirnika. Dodatkową trudnością w projektowaniu VAWT jest określenie optymalnej liczby łopat wirnika. W tego typu turbinie wirnik obraca się pod wpływem różnicy momentów powstałych na skutek różnego oporu, jaki stawia przepływowi wklęsła i wypukła strona łopat.

## 2. Teoria

W polskiej i światowej literaturze można znaleźć wiele obszernych publikacji opisujących mechanizm działania strugi gazu na daną powierzchnię oraz powstające siły. W tematyce turbin wiatrowych od wielu lat podstawową pozycją jest książka Jagodzińskiego [1] na temat budowy, działania, a także podstaw teoretycznych powstawania siły na łopatach turbin wiatrowej, wywołanych działaniem wiatru. Określając, jaką moc generuje w ten sposób dany profil, należy posłużyć się równaniem ciągłości:

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 = \text{const} \quad (1)$$

oraz prawem Bernoullego wyrażającego zasadę zachowania energii.

$$E_k + E_w + E_p = \text{const} \quad (2)$$

Łącząc je razem, otrzymuje się wzór dla przepływów nieściśliwych w postaci:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + q h_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + q h_2 = \text{const} \quad (3)$$

gdzie:

$v$  – prędkość wiatru [m/s];

$p$  – ciśnienie [Pa];

$\rho$  – gęstość powietrza [kg/m<sup>3</sup>];

$q$  – przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>];

$h$  – wysokość [m];

$A$  – pole powierzchni łopaty [m<sup>2</sup>].

Szukana siła naporu będzie od wielkości ciała, szybkości wiatru, jego kierunku, gęstości powietrza oraz właściwości powierzchni ciała. Zależność tę Jagodziński przedstawił w postaci:

$$F = C_n p A \quad (4)$$

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia sposób wyznaczania wartości i przebiegu mocy dla pojedynczej łopaty oraz całej turbiny o pionowej osi obrotu w zależności od ilości użytych łopat. W obliczeniach wykorzystano dane z pomiarów współczynnika oporu od kąta ustawienia profilu łopaty anemometru względem kierunku wiatru oraz pomiary sił działających na łopatę turbiny karuzelowej.

Słowa kluczowe: turbina karuzelowa, tunel aerodynamiczny, siłownia wiatrowa, moc, współczynnik oporu

**Abstract:** The article presents the method of determining the value and the power course for a single blade and the whole turbines with a VAWT, depending on the number of blades used. The calculations used data from coefficient of resistance measurements from the angle of the anemometer blade profile to the wind direction, and measurements of forces acting on the rotor blade.

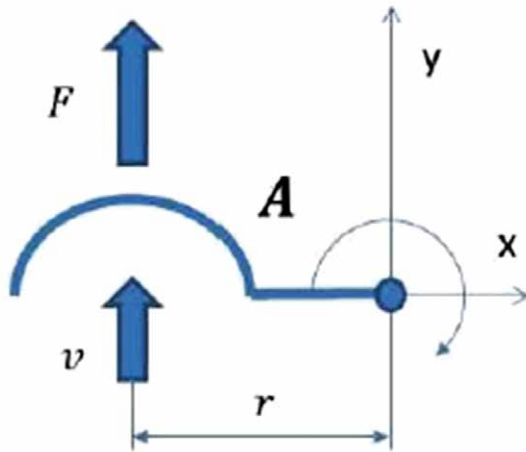
Keywords: rotary turbine, wind tunnel, wind turbine, power, coefficient of resistance

Składa się ona z współczynnika oporu  $C_n$ , który w praktyce jest funkcją liczby Reynoldsa i kształtu ciała, pola powierzchni łopaty  $A$  oraz ciśnienia  $p$ , opisującego spiętrzenie naporu wiatru na powierzchnię łopaty. Do wyznaczenia jego wartości stosuje się prawo Bernoullego (3), które po przekształceniach przyjmuje postać:

$$p = \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

Po podstawieniu wzoru (5) do (4) zauważymy, że wartość siły głównie zależy od prędkości wiatru  $V$ , która jest w kwadracie. Zależność (4) jest właściwa dla ciała będącego w spoczynku, natomiast łopata turbiny porusza się po okręgu wokół osi, urządzenia. Wobec tego należy rozbić wartości  $v$  na różnicę prędkości wiatru  $V$  i prędkość liniową poruszającej się łopaty  $u$ . Ostateczny wzór na siłę naporu działającą na powierzchnię łopaty (rys. 1) przyjmie postać:

$$F = 0,5 C_n \rho A v^2 = 0,5 C_n \rho A (V - u)^2 \quad (6)$$



Rys. 1. Działanie siły wiatru na pojedynczą łopate

Moc generowaną przez łopate turbiny wyznaczamy ze wzoru:

$$P = M \omega \quad (7)$$

gdzie moment  $M$  jest to wartość siły działająca na danym ramieniu, a prędkość kątowa  $\omega$  to stosunek prędkości liniowej do promienia, na jakim działa.

Stąd wzór na moc przyjmie postać:

$$P = 0,5 C_n \rho A (V - u)^2 r \frac{V}{r} \quad (8)$$

Można zauważyć, że redukcji ulega wartość promienia, czyli odległości od osi obrotu. Oznacza to, że generowana moc łopaty nie zależy od ramienia, na jakim działa siła naporu. Ostateczny wzór na moc generowaną przez łopate poruszającą się z kierunkiem wiatru przyjmie postać:

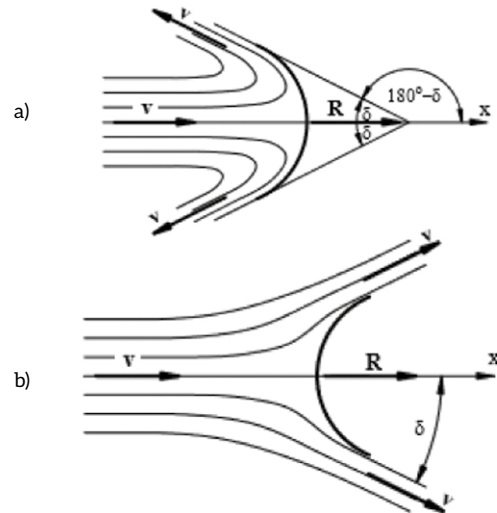
$$P = 0,5 C_n \rho A (V - u)^2 V \quad (9)$$

a dla łopaty poruszającej się pod wiatr:

$$P = 0,5 C_n \rho A (V + u)^2 V \quad (10)$$

Przedstawione wzory są zalecane dla profili łopat o przekroju skrzydła, dla których w literaturze [1, 2] można znaleźć wyniki badań opisujących wartości współczynnika oporu  $C_n$  w zależności od kąta obrotu łopaty względem kierunku działania wiatru.

W przypadku badanego profilu łopaty turbiny karuzelowej brak jest takowych badań poza podanymi wartościami współczynnika oporu powietrza dla strony wklęsłej i wypukłej. Wobec tego, aby obliczyć siłę naporu na pojedynczą łopate w zależności od jej kąta obrotu, rozpatrzmy ją jako uderzenie strugi o powierzchnię zakrzywioną. Zakładając, że pęd masy elementarnej strugi swobodnej jest równy zmianie gęstości powietrza, strumienia objętości i prędkości wiatru w czasie. Po



Rys. 2. Reakcja na przegrodę walcową zwróconą [3]:

a) wklęsłością w stronę strugi; b) wypukłością w stronę strugi

uderzeniu strugi w powierzchnię zakrzywioną łopaty rozdziela się na dwie części (rys. 2). Wobec tego wzór na moc dla łopaty zwróconej stroną wklęsłą przyjmie postać:

$$P = A \cdot \rho \cdot v^3 \cdot (1 + \cos\delta) \quad (11)$$

Natomiast dla łopaty zwróconej stroną wypukłą, prawidłowa jest zależność:

$$P = A \cdot \rho \cdot v^3 \cdot (1 - \cos\delta) \quad (12)$$

gdzie:  $\cos\delta$  – parametr wyrażający współczynnik kształtu łopaty.

Ponieważ w symulacjach zostaną użyte dane dla dwóch różnych profili łopat, to najlepszą wielkością, która pozwoli nam je porównać, jest bezwymiarowy współczynnik oporu. Wyznaczony doświadczalnie dla każdego ciała o różnych wymiarach i kształcie, uwzględnia jego wielkość, kierunek i prędkość, z jaką działa na nie wiatr oraz ciśnienie dynamiczne. Współczynnik siły oporu przedstawia się według zależności (13).

$$C_n = \frac{F \text{ siła równoległa do osi wiatru}}{p \cdot A} \quad (13)$$

W mianowniku tego wyrażenia znajduje się wielkość nazywana ciśnieniem dynamicznym, oznaczonym jako  $q$ , którego wartość opisuje iloraz gęstości i kwadratu prędkości cieczy.

W praktyce współczynniki te są funkcją liczby Reynoldsa i kształtu ciała. Znając charakterystykę aerodynamiczną ciała, kąt działania siły wiatru, można wyznaczyć zależność pomiędzy liczbą Reynoldsa i współczynnikiem oporu.

Liczba Reynoldsa jest wielkością opisującą ruch ciała w cieczach i gazach, na jej podstawie możemy określić, czy ten ruch jest laminarny lub turbulentny.

Na jego wielkość ma wpływ stosunek wielkości przeszkody i prędkości wiatru do lepkości kinematycznej cieczy lub gazu.

$$Re = \frac{\text{wielkość przeszkody} \cdot \text{prędkość wiatru}}{\text{lepkość kinematyczna}} \quad (14)$$

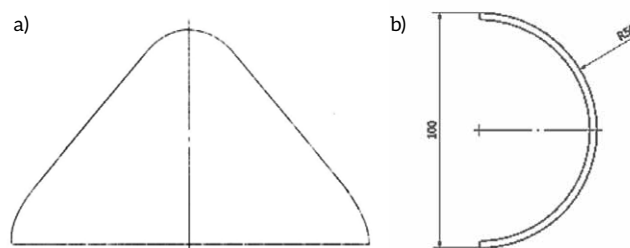
W celu dokonania obliczeń teoretycznych należy przyjąć pewne zasady i uproszczenia. Ze względu na to, że ruch mas powietrza nie ma charakteru jednorodnego i jest zazwyczaj ruchem turbulentnym, postanowiono wykonać wstępne badania symulacyjne dla ruchu laminarnego. W uproszczonych obliczeniach, przy rozpatrywaniu oddziaływania strugi powietrza na łopate, nie bierze się pod uwagę tego, co dzieje się wokół łopaty, a jedynie oddziaływanie samej strugi na łopate. Do celów obliczeniowych szerokość strugi powietrza jest porównywalna z szerokością łopaty, a prędkość poruszania się łopaty jest zerowa. Kolejnym założeniem jest to, że energia strugi wiatru jest całkowicie przekształcona w energię naporu na łopate.

### 3. Metody badawcze

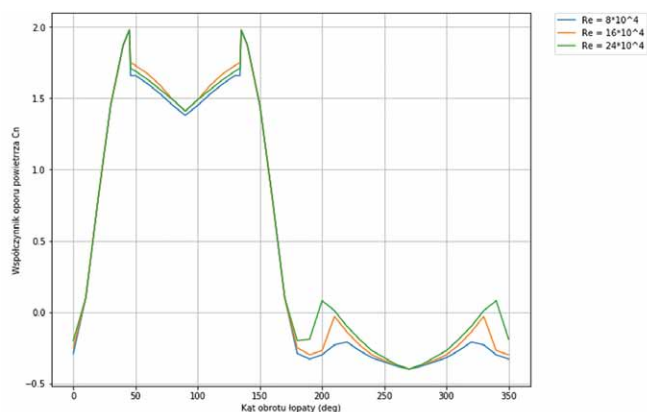
Przedmiotem opracowania jest znalezienie sposobu na określenie optymalnej liczby łopat w turbinie wiatrowej typu VAWT. W symulacjach posłużono się programami Matlab i Jupyter notebook. Matlab posiada funkcję sumowania pól wykresu, dzięki czemu można obliczyć całkowitą moc turbiny wielołopatowej w zależności od liczby łopat. Należy jednak przy tego typu wstępnych rozważaniach dokonać pewnych założeń, takich jak rodzaj turbiny, rodzaj sił działających na część roboczą, czyli łopaty, oraz uprościć zjawiska zachodzące w tym przypadku. Takim uproszczeniem jest wybór siły naporu na nieruchomą łopate, a także rezygnacja z rozpatrywania zjawisk zachodzących wokół łopaty. Dużym uproszczeniem jest założenie, że siły powstające na łopacie zmieniają się wraz z kątem obrotu łopaty w postaci sinusoidy, oraz to, że energia wiatru całkowicie jest przekazywana na łopate, przez co nie stosujemy limitu Betza. Założenia te są słuszne dla jednego stanu ustalonego, np. nieruchomej turbiny i łopaty ustawionej częścią wklęsłą prostopadle do kierunku wiatru. Jednakże dokonując takich uproszczeń, a przy ich pomocy obliczeń, jesteśmy w stanie stwierdzić, jakie parametry mogą być przypisane do danego urządzenia w znacznym przybliżeniu.

Do przeprowadzonych symulacji obliczenia mocy pojedynczej łopaty posłużono się danymi z pomiarów dwóch rodzajów profili. Do obliczenia wartości współczynnika oporu zastosowano wzór (13.) W pierwszym przypadku wykorzystano badania pomiaru siły [4] przeprowadzone na łopacie turbiny karuzelowej (rys. 3), a w drugim badanie anemometru zawarte w pracy [2], które przedstawiają zależność współczynnika oporu powietrza, dla różnych liczb Reynoldsa, od kąta działania wiatru na powierzchnię łopaty (rys. 4). Przekroje profili przedstawiono na rysunku 3. Wybór kształtu łopaty anemometru kubelkowego do porównań jest spowodowany dużym podobieństwem konstrukcji i sposobu działania obu urządzeń, które są turbinami o pionowej osi typu VAWT. Zestawienie wartości współczynnika oporu powietrza  $C_n$  w zależności od kąta obrotu profili obu łopat względem kierunku wiatru, dla różnych wartości liczby Reynoldsa, przedstawiono na rys. 4.

Z przedstawionych wyników pomiarów dla kształtu łopaty anemometru kubelkowego, wynika związek wzrostu siły i mocy



Rys. 3. Profile: a - anemometru; b - badanej łopaty



Rys. 4. Zmiana wartości współczynnika oporu, w zależności od kąta padania strugi wiatru na łopate [3]

z wartością liczby Reynoldsa dla danego profilu. Dla jej niskich wartości wykresy mają łagodny przebieg, przy wyższych można zauważyć wyraźne skoki. Wykresy mają również charakterystyczne punkty, w okolicy 45 stopni można zauważyć wyraźny skok spowodowany zmianą profilu wiatru za przeszkodą.

Co ciekawe, wartości dla 45 stopni są wyraźnie wyższe od 0 stopni, co świadczy o tym, że straty na sile oporu są niższe niż zyski z siły nośnej, przedstawianej w zależności:

$$P_z = C_z \rho A \frac{V'^2}{2} \quad (15)$$

gdzie:

$C_z$  – współczynnik siły nośnej;

$V'$  – prędkość ciała względem płynu [m/s].

Z tego względu nawet na tak prostym przykładzie nie można pominąć siły nośnej i polegać wyłącznie na sile oporu przeszkody. Przy 90 stopniach łopata przechodzi przez oś kierunku wiatru, osiągając wartości ujemne. Minimum mocy osiąga się przy kącie 180 stopni, czyli wtedy, gdy struga wiatru pada prostopadle na tylną powierzchnię łopaty.

Podobny wykres przedstawiono dla wartości oporu  $C_n$  dla badanej łopaty turbiny karuzelowej, gdzie współczynnik oporu obliczono dla prędkości wiatru równej 5, 10 i 15 m/s. Jego przebieg przedstawiono na rysunku 5. Widać na nim, że wraz ze wzrostem prędkości wiatru rośnie wartość współczynnika oporu dla strony wypukłej, a maleje dla strony wklęsłej łopaty.

Na rysunku 6 zestawiono wyniki obliczeń współczynnika  $C_n$  dla łopaty badanej i anemometru. Można zauważyć, że skala i przebieg wykresów dla obu łopat jest podobna, co potwierdza wcześniejsze założenia o dużym podobieństwie obu profili. Niemniej jednak, o ile przebiegi wykresów dla części wypukłej są podobne, to dla części wklęsłej widać niewielkie różnice. Mogą one być spowodowane zbyt małą dokładnością pomiarową stanowiska i faktem, że pomiary sił były prowadzone co 15 stopni, natomiast dla łopaty anemometru odpowiednio co 10 stopni, a w miejscach zawirowań 45, 90 i 135 stopni z dokładnością co 1 stopień.

Kolejnym elementem, który ma wyraźny wpływ na sposób i wielkość generowanej mocy jest liczba zastosowanych łopat w konstrukcji. Na załączonym rysunku 7 przedstawiono wykresy mocy dla turbiny z trzema, pięcioma i sześcioma łopatami. Wynika z nich, że zwiększenie liczby łopat daje spadek mocy na pojedynczej łopacie, ale jest ona wytwarzana w sposób bardziej równomierny.

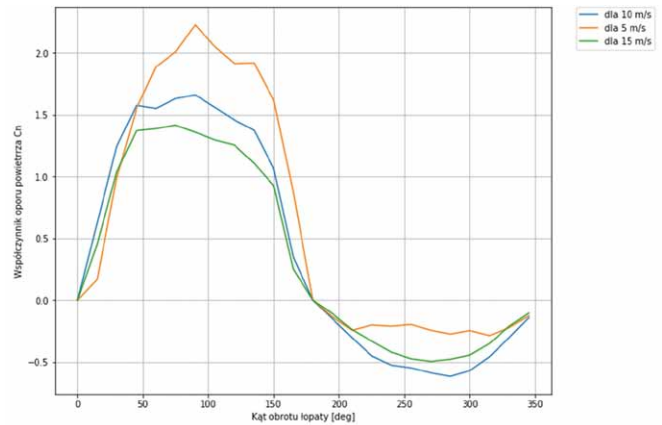
Dla porównania przeprowadzono podobne obliczenia przy pomocy wyżej opisanych zależności (11) i (12). W celu dokonania obliczenia widma mocy wykorzystano środowisko obliczeniowe programu Matlab. Turbina 3-łopatowa (rys. 8) wytwarza moc mniejszą od mocy pojedynczej łopaty – współczynnik  $k_1$  mniejszy od 1. Wynika to z faktu, że przy ustawieniu łopat, gdy jedna znajduje się po stronie zbiegającej turbiny, a dwie pozostałe po stronie nabiegającej, siły naporu zbliżają się do równowagi, w związku z tym turbina wytraca moment obrotowy i dąży do zatrzymania. Dzięki sile bezwładności i różnicy we współczynniku oporu turbina posiada zdolność do generowania mocy, jednak mniejszej niż pojedyncza łopata.

Z kolei turbina 4-łopatowa (rys. 9) wytwarza moc tylko nieznacznie większą, o współczynniku mocy całej turbiny do pojedynczej łopaty  $k_1 = 1,3$ , jednak w pewnych momentach mniejszą od mocy pojedynczej łopaty, co nadal jest zjawiskiem niepożądanym. Tak jak w poprzednim przypadku, moment obrotowy charakteryzuje się wysokim tętnieniem.

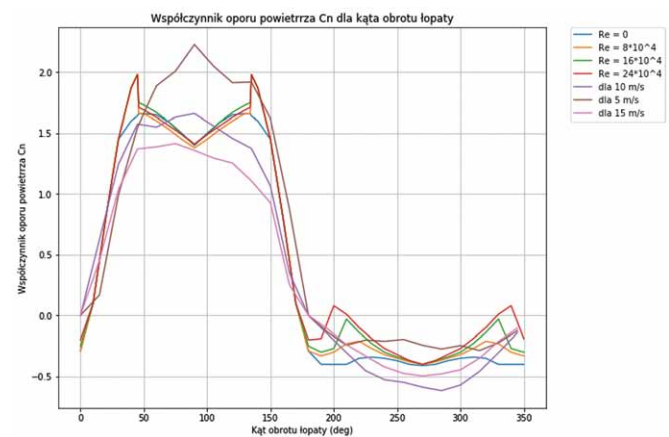
Turbina 5-łopatowa (rys. 10) posiada współczynnik stosunku mocy całej turbiny do pojedynczej łopaty około  $k_1 = 1,5$ . Widmo mocy jest zadowalające, jednakże jeżeli weźmiemy pod uwagę możliwości wykorzystania całej energii wiatru oraz sprawność urządzenia, może okazać się, że tego typu rozwiązanie nie jest rozwiązaniem optymalnym.

Turbina 7-łopatowa (rys. 11) posiada współczynnik  $k_1 = 2$ . Widmo mocy znacznie powyżej mocy pojedynczej łopaty. Górna część wykresu w miarę równa, co nie powoduje powstawania skoków momentu obrotowego i zapewnia stabilną prędkość obrotową turbiny. Racjonalne jest zastosowanie turbiny 5- lub 7-łopatowej. Należałoby prześledzić jeszcze wykres widma mocy turbiny 9-łopatowej, ale już przy turbinie 7-łopatowej widać, że wykresy mocy poszczególnych łopat zachodzą na siebie, co wytwarza efekt cienia aerodynamicznego.

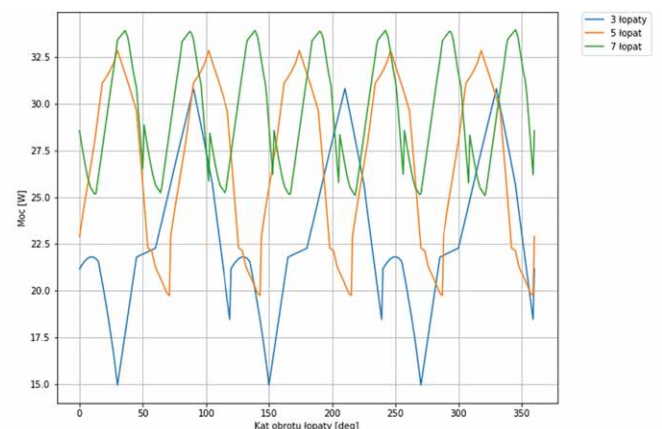
Ostatnim elementem wpływającym na wartość mocy turbiny, a pomijającym we wzorach, jest opór magnetyczny silnika elektrycznego, zależny od strumienia magnetycznego wirnika i szczeliny powietrznej pomiędzy wirnikiem a twornikiem. Jest to wartość zależna od charakterystyki urządzenia i jego wielkości, którą należy wyznaczać doświadczalnie.



Rys. 5. Zmiana wartości współczynnika oporu w zależności od kąta padania strugi wiatru na badaną łopate



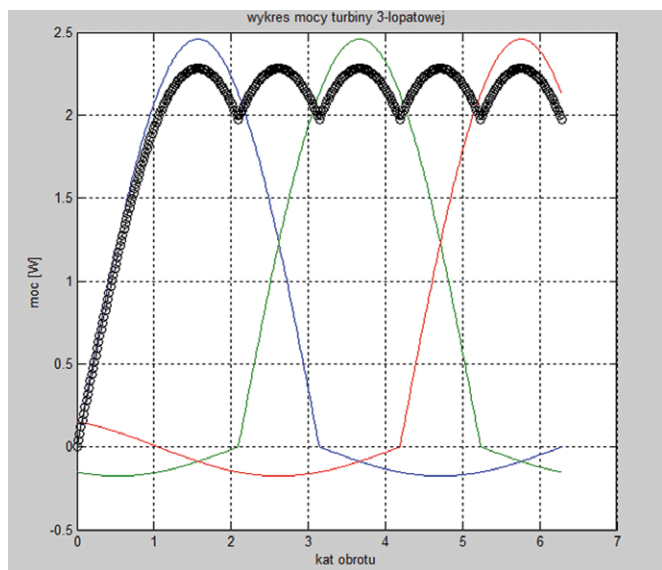
Rys. 6. Porównanie wartości współczynnika oporu dla łopaty anemometru i badanego profilu turbiny



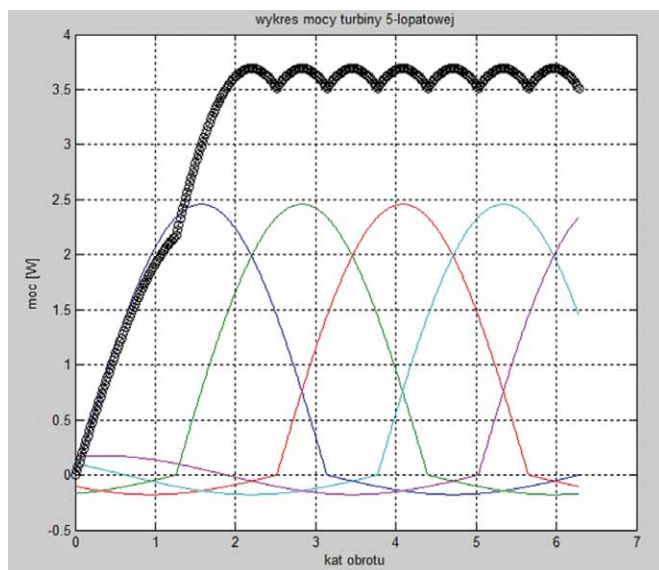
Rys. 7. Porównanie wartości mocy turbiny w zależności od liczby łopat w turbinie

## Podsumowanie

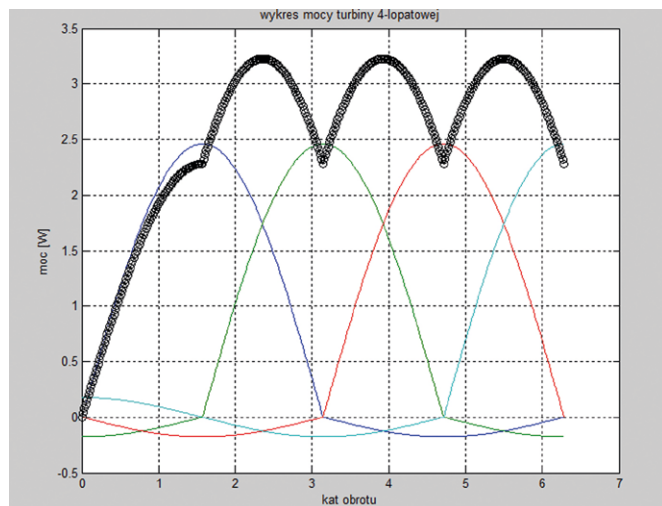
Powyższy artykuł ma na celu przybliżyć sposób wyznaczania wartości mocy dla turbin o pionowej osi obrotu oraz stopień



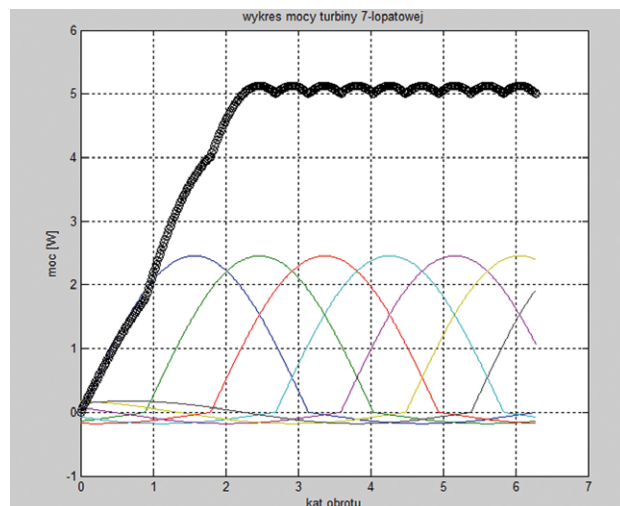
**Rys. 8.** Wykres widma mocy dla turbiny 3-łopatej



**Rys. 10.** Wykres widma mocy dla turbiny 5-łopatej



**Rys. 9.** Wykres widma mocy dla turbiny 4-łopatej



**Rys. 11.** Wykres widma mocy dla turbiny 7-łopatej

skomplikowania wynikający z wielu czynników wpływających na działanie tak prostego w sposobie działania urządzenia.

Jak zostało wykazane w niniejszym opracowaniu, moc turbiny ściśle zależy od liczby łopatek, jednak przy zastosowaniu uproszczenia, że łopaty nie pozostawiają za sobą cienia aerodynamicznego, tzn. nie przysłaniają łopatek wcześniejszych. Ze wzrostem liczby łopatek efekt cienia aerodynamicznego rośnie. Za stosowaniem większej liczby łopatek przemawia również fakt, że większa liczba łopatek zwiększa moment obrotowy, a co za tym idzie – większą płynność obrotową turbiny. Efekt ten wykorzystany jest w turbinach bębnowych. Dobierając liczbę łopatek do turbiny karuzelowej, musimy kierować się kryteriami sprawnościowymi i ekonomicznymi. Zbyt mała liczba łopatek powodować będzie, że turbina nie osiągnie wysokiej sprawności, a zatem odpowiedniej mocy. Zbyt duża liczba łopatek spowoduje niepotrzebny wzrost kosztu produkcji turbiny, a także większe obciążenie masztu i osi turbiny.

**Literatura**

- [1] JAGODZIŃSKI W.: *Silniki wiatrowe*. PWT, Warszawa 1959.
- [2] JEŻOWIECKA-KABSCH K., SZEWCZYK H.: *Mechanika płynów*. Wrocław 2001.
- [3] BREVOORT M.J., JOYNER U.T.: *Aerodynamic Characteristics of AnemometerCups*. Washington 1934.
- [4] FEDAK W., GANCARSKI W., ANWEILER S., NIEŚLONY A., ULBRICH R.: *Turbina wiatrowa VAWT – pomiar sił naporu łopaty w tunelu aerodynamicznym*. „Napędy i Sterowanie” 5/2018.

Waldemar Fedak, Wojciech Gancarski, Stanisław Anweiler, Adam Nieślony, Roman Ulbrich – Politechnika Opolska

artykuł recenzowany