

Andrzej DUDZIAK<sup>1</sup>  
Tomasz BINKOWSKI<sup>2</sup>

## BADANIE PODSTAWOWYCH CHARAKTERYSTYK MODELU TURBINY WIATROWEJ WINDPITCH™

W artykule przedstawiono przebieg i wyniki badań, których celem było wykreślenie najważniejszych charakterystyk modelu turbiny wiatrowej WindPitch™. Konstrukcja modelu firmy Horizon Fuel Cell pozwala na kompleksowe badanie zjawisk fizycznych związanych z pracą turbiny oraz umożliwia pomiar i obliczenie parametrów technicznych i określenie charakterystyk pracy dla różnych konfiguracji modelu. Zmienność najistotniejszego parametru badanego modelu, czyli generowanej mocy wyjściowej w funkcji prędkości wiatru, zmierzono dla różnych konfiguracji łopatek zamontowanych w wirniku. Analizie poddano zarówno wpływ kształtu profilu łopatek, zmiany kąta ich natarcia oraz różną ich liczbę zamontowaną w rotorze. Przebadano moc generowaną przez model z zainstalowanym wirnikiem trójłopatowym, dla kątów 10, 30 i 60 stopni, dla każdego z badanych profili, BP-28, BP-44 i BP-63. Przeanalizowano ponadto cztery warianty rozbudowy wirnika turbiny. Moc generowaną w funkcji prędkości wiatru określano dla wirników o dwóch, trzech, czterech i sześciu łopatach, przy stałym kącie ich nachylenia - 10 stopni. Dla każdej z konfiguracji określono również prędkość startową, a jej zmienność w zależności od konfiguracji przedstawiono na stosownych wykresach. Pomiar przeprowadzono w zakresie zmian prędkości wiatru, dla których parametry znamionowe pracy danego modelu nie były przekraczane. Pomiaru mocy  $P_E$  generowanej przez turbinę dokonywano metodą techniczną pośrednią, prędkość obrotową natomiast określano metodą bezpośrednią, za pomocą tachometru. Zmian prędkości wiatru dokonywano z użyciem układu wentylatora i falownika, a za pomiar jego prędkości odpowiadały dwa anemometry czasowe.

**Słowa kluczowe:** wiatr, energia wiatru, turbina wiatrowa, charakterystyka mocy, WindPitch

---

<sup>1</sup> Andrzej Dudziak, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, andrzej.dudziak1@gmail.com

<sup>2</sup> Autor do korespondencji: Tomasz Binkowski, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 865 1974, tbinkow@prz.edu.pl.

## 1. Wprowadzenie

Artykuł ten skupia się na przedstawieniu i omówieniu wyników badań modelu turbiny wiatrowej o poziomej osi obrotu HAWT. Takie rozwiązanie budowy jest najczęstsze w zawodowej energetyce wiatrowej. Siłownie wiatrowe obecnie są bardzo korzystnym i atrakcyjnym źródłem mocy dla krajowego systemu elektroenergetycznego, mogącym w płynny i stosunkowo szybki sposób wesprzeć rozwój energetyki w Polsce. Ich implementacja nie wymaga dużych zmian w sieciach rozdzielczo-przesyłowych, a koszty i czas budowy pozwalają na szybkie uruchamianie nowych instalacji, nawet w ciągu jednego roku [2]. Według danych Urzędu Regulacji Energetyki na koniec września 2013 roku, istnieje w Polsce 795 instalacji wiatrowych o łącznej mocy 3 082 MW, a ich udział w krajowej produkcji energii elektrycznej wynosi 3,53% i liczby te stale rosną [5]. Ze względu na to niezbędny jest ciągły rozwój technologii budowy elektrowni, udoskonalanie turbin i rozwiązań w nich stosowanych, w celu zwiększania ich sprawności, poprawienia elastyczności pracy i poszerzenia zakresu ich użytkowania.

W artykule skupiono się na przedstawieniu wyników badań modelu turbiny wiatrowej, którym jest model WindPitch™. Został on zakupiony na potrzeby laboratorium Wydziału Elektrotechniki i Informatyki, do badania odnawialnych źródeł energii i stanowi najważniejszą część stworzonego stanowiska do badania zjawisk towarzyszących pracy siłowni wiatrowej.

## 2. Opis badań

### 2.1 Energia wiatru- charakterystyka ogólna

Praca siłowni wiatrowej zależna jest praktycznie jedynie od parametrów wiatru, tj. jego prędkości i zmienności w czasie. Siłownię wiatrową projektuje się w zależności od warunków wietrznych występujących w danej lokalizacji. Wymiary i moc turbiny zależne są od szeregu czynników, zarówno technicznych, jak i środowiskowych. Należy pamiętać, że koszty związane z budową elektrowni wiatrowej rosną wykładniczo, a nie liniowo, w zależności od mocy którą planuje się zainstalować, dlatego też często uzasadnione ekonomicznie jest zastosowanie dwóch mniejszych turbin, niż jednej większej o tej samej mocy [4].

Energię wiatru stanowi energia kinetyczna poruszającej się masy powietrza. Jeżeli strumień ten, o masie  $m$  i prędkości  $V$ , przepływa przez powierzchnię o przekroju  $A$ , wówczas jego moc teoretyczną  $P_w$  można obliczyć zgodnie z zależnością (1).

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

Energii kinetycznej wiatru nie da się jednak przetworzyć ze stuprocentową sprawnością na inny rodzaj energii. Moc uzyskiwana z energii poruszającego się powietrza, przez przetwornik jakim jest turbina wiatrowa, jest znacznie mniejsza od mocy teoretycznej  $P_w$ . Moc ta jest równa różnicy energii powietrza poruszającego się przed i za przetwornikiem, przy czym pole przekrojów  $A_1$  i  $A_2$  mogą się różnić. Pełne przetworzenie energii wiatru nie jest możliwe, chociażby ze względu na to, że oznaczałoby to iż prędkość strugi powietrza za turbiną byłaby równa zero, co fizycznie jest niemożliwe. Moc uzyskana  $P_u$  (mechaniczna), którą pobiera od wiatru przetwornik jakim jest siłownia wiatrowa, określona jest zależnością (2).

$$P_u = P_{w1} - P_{w2} = \frac{1}{2} \rho (A_1 V_1^3 - A_2 V_2^3) \quad (2)$$

Moc elektryczna  $P_E$  wytworzona przez siłownię wiatrową nie jest jednak równa mocy mechanicznej  $P_u$ . Praca turbiny wiatrowej wiąże się z występowaniem szeregu strat. Do najważniejszych z nich należą straty mechaniczne i aerodynamiczne układu wirnika siłowni, straty w przekładni, generatorze i urządzeniach przetwarzających wytworzoną energię. Teoretyczna maksymalna sprawność przetwarzania wiatru przez turbinę, związana z prawem Betza, wynosi 59,3 %. Sprawność całkowita siłowni stosowanych w energetyce zawodowej z reguły nie przekracza wartości 30 %. Składają się na nią zarówno sprawność przetwarzania energii wiatru, jak i sprawności generatora oraz pozostałych układów [1].

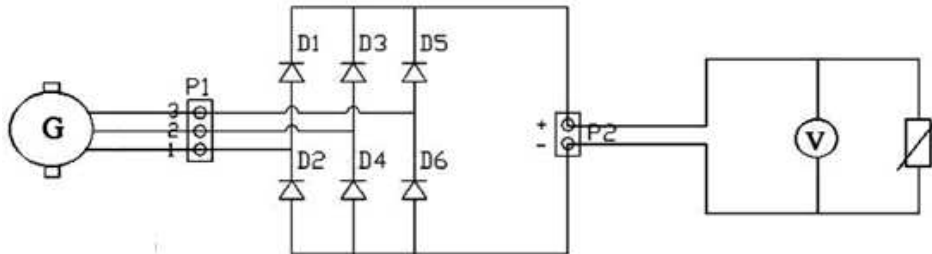
Obecnie zawodowa energetyka wiatrowa opiera się głównie na turbinach o poziomej osi obrotu (HAWT). Najczęściej stosowane są siłownie z wirnikiem o trzech łopatach i możliwością zamiany kąta ich nachylenia (pitch control) w celu regulacji mocy oddawanej. Charakteryzują się znacznie wyższą sprawnością w stosunku do siłowni o pionowej osi obrotu. Produkowane są w bardzo szerokim zakresie mocy znamionowych, od kilkudziesięciu watów do kilku megawatów. Duże jednostki mogą osiągać moce przekraczające nawet 5MW.

Wraz ze zmianami prędkości wiatru zmienia się moc wyjściowa elektrowni wiatrowej. Zależność pomiędzy tymi wielkościami przedstawia krzywa mocy turbiny. Ważne jest, aby krzywa była jak najbardziej stroma, a maksimum osiągała przy jak najmniejszej prędkości wiatru. Współczesne siłownie wiatrowe osiągają nominalne warunki pracy przy prędkościach wiatru rzędu 15 m/s. Dla każdej turbiny wiatrowej można wyznaczyć charakterystykę zakresu jej pracy i mocy generowanej w funkcji prędkości wiatru, opisaną w literaturze [3]. Z charakterystyki tej można odczytać prędkość startową turbiny, zakres jej pracy z mocą znamionową oraz prędkość wyłączenia turbiny. Dopóki wiatr nie osiągnie

prędkości nominalnej, dla danej turbiny, steruje się nią tak aby generowała możliwie maksymalną moc. Jeżeli siłownia wejdzie w zakres pracy znamionowej, utrzymuje się wytwarzaną moc na nominalnym poziomie, poprzez różnego rodzaju metody regulacji mocy oddawanej charakterystyczne dla konkretnych rozwiązań budowy turbiny.

## 2.2 Opis stanowiska pomiarowego

Stanowisko pomiarowe przeznaczone do badania charakterystyk modelu turbiny wiatrowej składa się z trzech zasadniczych segmentów. Najistotniejszy z nich stanowi element badany, czyli model turbiny wiatrowej WindPitch™, zamontowany na specjalnie zaprojektowanej szynie montażowej. Do kolejnej grupy urządzeń należy wentylator kanałowy Wentech o mocy 1,1 kW, który symuluje wiatr, generując strugę powietrza omywającą badaną turbinę. Jest on zasilany z falownika, ze względu na możliwość precyzyjnej regulacji prędkości obrotowej wentylatora, a zatem regulacji prędkości generowanej strugi powietrza. Urządzenia pomiarowe przyłączone do układu stanowią trzeci segment stanowiska. Należą do nich: 2 anemometry czasowe, do pomiaru prędkości wiatru przed i za badaną turbiną, umieszczone na szynie montażowej turbiny, multimetr cyfrowy, do pomiaru wartości napięcia stałego, odkładającego się na rezystancji obciążenia, przyłączonej do zacisków układu generatora elektrycznego, napędzanego przez turbinę, oraz tachometr laserowy, do pomiaru prędkości obrotowej wirnika turbiny. Elementem symulującym obciążenie generatora turbiny jest rezystor dekadowy. Mierzony na nim spadek napięcia, stanowi podstawę do obliczenia mocy elektrycznej generowanej przez turbinę. Schemat elektryczny układu pomiarowego przedstawia rysunek.1. Stanowisko wyposażone jest również w osłonę użytkownika, wykonaną z przezroczystego tworzywa. Jako podstawa dla całego stanowiska użyty został wytrzymały, stalowy stół warsztatowy Techwar.



Rys. 1. Schemat elektryczny modelu turbiny i połączeń układu pomiarowego

Fig. 1. Electrical diagram of wind turbine model and connections in measuring system

Szczegółowe dane znamionowe urządzeń pomiarowych i badanego modelu turbiny wiatrowej opisano w pracy ujętej w literaturze [2].

### 2.3 Opis przeprowadzonych badań

Analizie badawczej poddane zostały charakterystyki mocy elektrycznej generowanej przez turbinę w funkcji prędkości wiatru  $P_E=f(V')$ . Badania przeprowadzono dla różnych konfiguracji wirnika modelu. Określono parametry turbiny dla wirnika trójpłatowego, w którym montowano różne profile łopat, dostarczone przez producenta modelu. Dla każdej z konfiguracji, wykorzystującej inny z analizowanych profili, badania przeprowadzono przy zmiennych kątach nachylenia łopat. Analizowano moc generowaną dla kątów 10, 30 i 60 stopni, dla każdego z badanych profili, BP-28, BP-44 i BP-63.

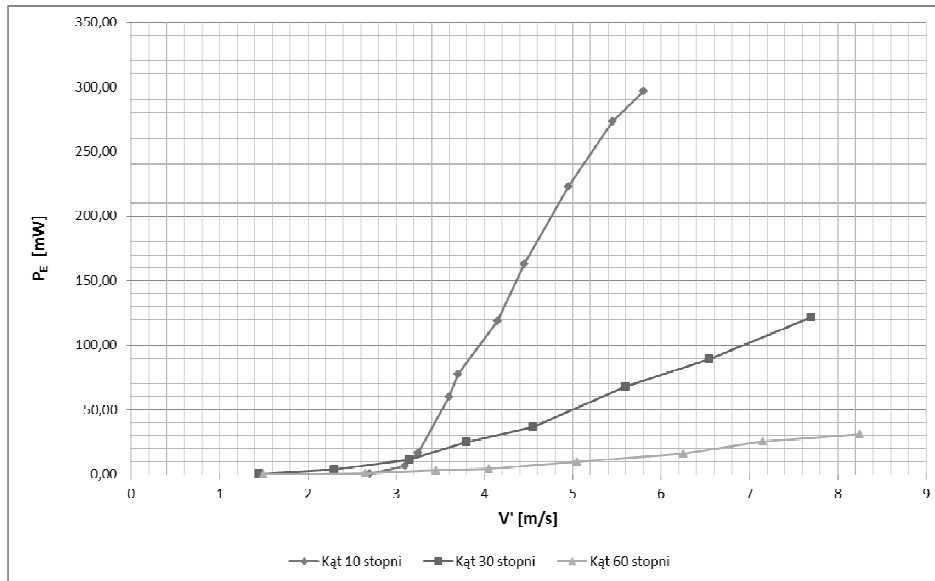
Badaniom poddano również cztery warianty rozbudowy wirnika turbiny, o różnej ilości zainstalowanych w nim łopat. Moc generowaną w funkcji prędkości wiatru określano dla wirników o dwóch, trzech, czterech i sześciu łopatach, przy stałych kącie ich nachylenia, 10 stopni, dla każdej z konfiguracji rozbudowy.

Dla każdej z opisanych i zbadanych konfiguracji, analizując dane pomiarowe, można wyznaczyć prędkość startową turbiny. Otrzymane wartości prędkości startowych również zostały poddane analizie.

### 3. Prezentacja wyników

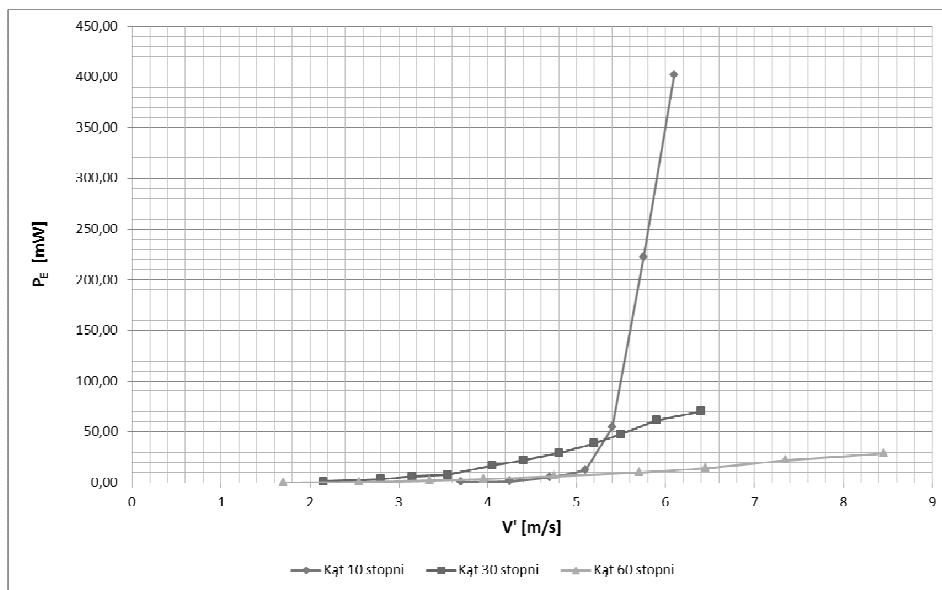
Z danych zebranych z pomiarów wykreślono charakterystyki zależności mocy elektrycznej generowanej przez turbinę WindPitch™, w funkcji prędkości wiatru  $P_E = f(V')$ , dla poszczególnych konfiguracji wirnika trójpłatowego, ze zmiennymi łopatom, z uwzględnieniem kolejnych zmian ich kąta nachylenia. Wykreślono ponadto charakterystyki porównawcze analizowanych profili, przy danych kątach nachylenia łopat oraz charakterystykę porównawczą dla czterech wariantów rozbudowy wirnika turbiny, o różnej ilości zainstalowanych łopat, przy stałych kącie ich nachylenia dla każdego z wariantów.

Rodzinę punktowych charakterystyk prędkości startowej turbiny  $V_s$  od konfiguracji rotora, wyznaczono dla trzech badanych profili łopat wirnika trójpłatowego, przy każdym analizowanym kącie ich ustawienia. Za start turbiny uważa się rozpoczęcie jej płynnego ruchu obrotowego. Dla każdej konfiguracji rotora wykreślono wartość prędkości wiatru, która jest dla niej prędkością startową. Analogiczny tok postępowania przyjęto określając prędkość startową dla wirnika dwu-, trój-, cztero-, sześćo-płatowego, które analizowano przy stałym kącie ustawienia łopat 10°.



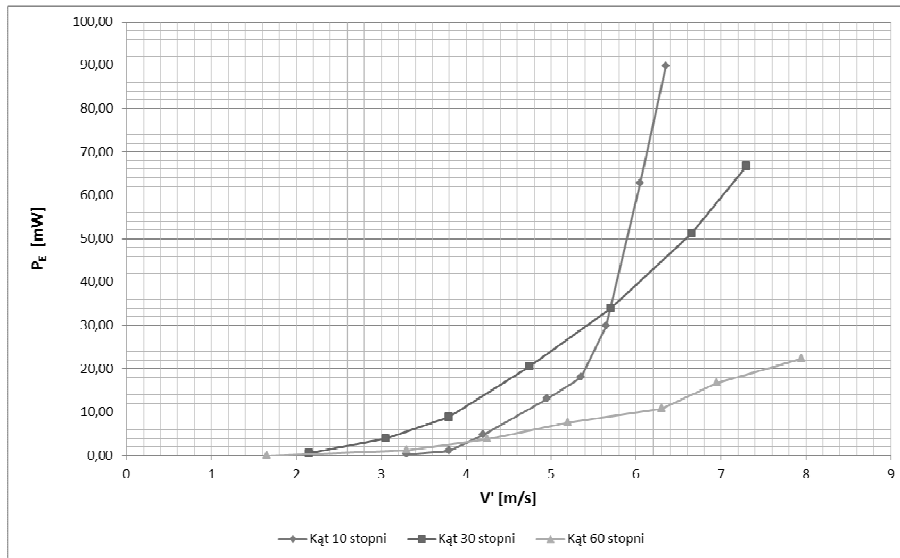
Rys. 2. Charakterystyki dla profilu BP-28

Fig. 2. Characteristics of BP-28 profile



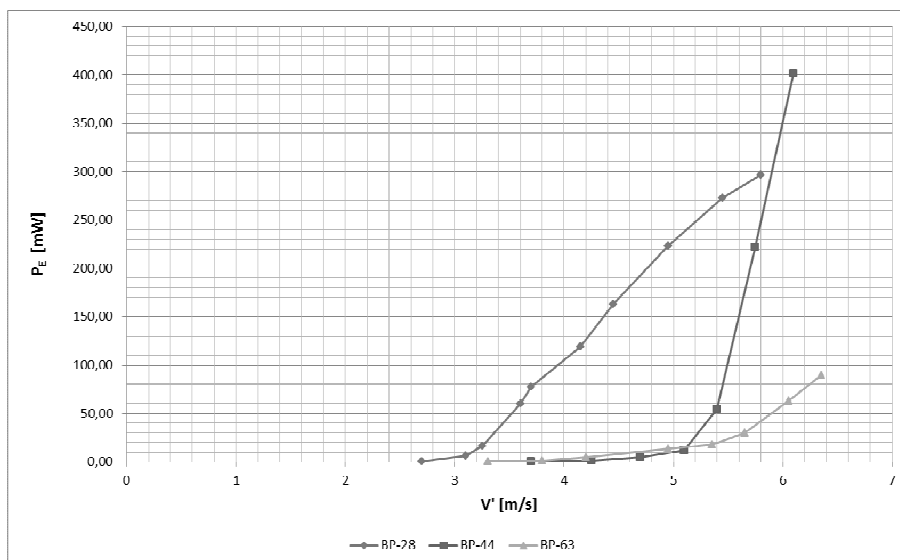
Rys. 3. Charakterystyki dla profilu BP-44

Fig. 3. Characteristics of BP-44 profile



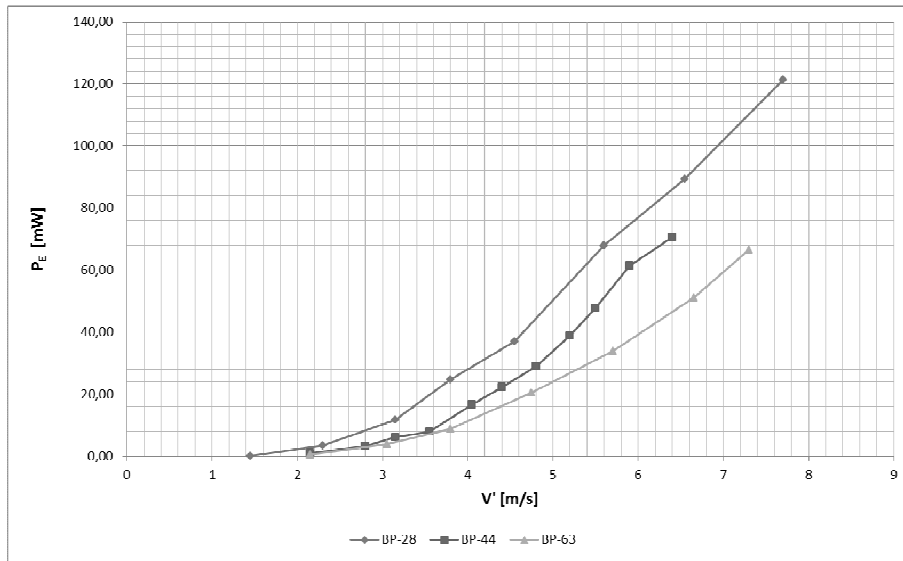
Rys. 4. Charakterystyki dla profilu BP-63

Fig. 4. Characteristics of BP-63 profile



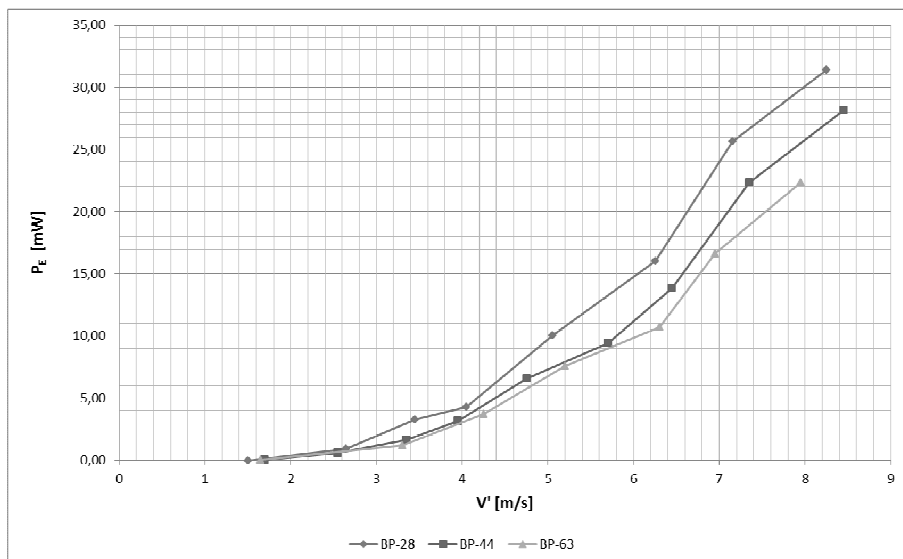
Rys. 5. Charakterystyka porównawcza dla kąta 10 stopni

Fig. 5. Comparative characteristics for 10 degrees angle



Rys. 6. Charakterystyka porównawcza dla kąta 30 stopni

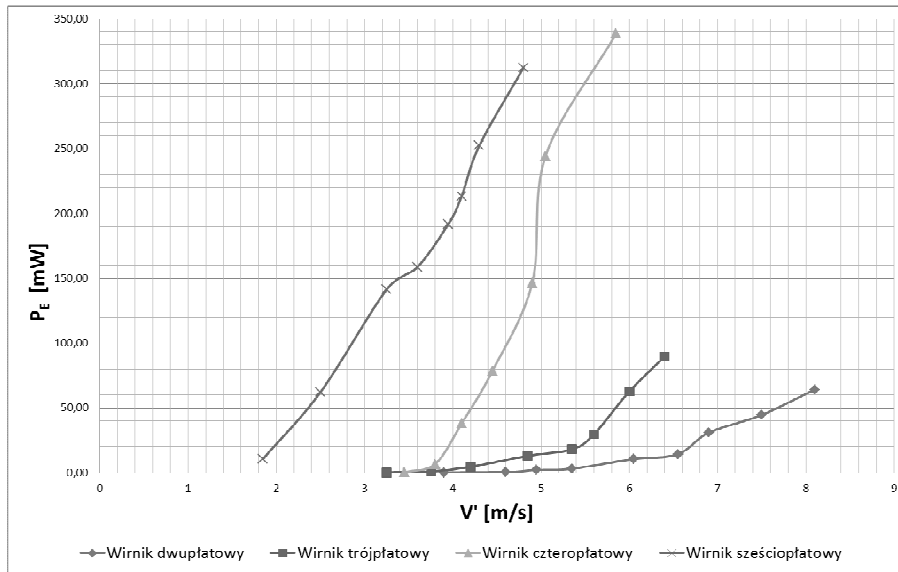
Fig. 6. Comparative characteristics for 30 degrees angle



Rys. 7. Charakterystyka porównawcza dla kąta 60 stopni

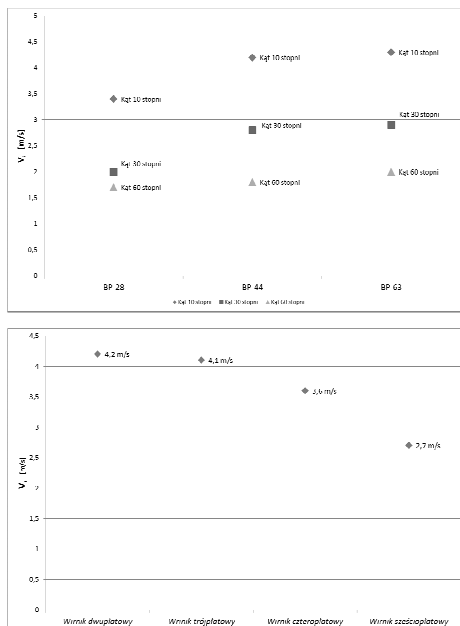
Fig. 7. Comparative characteristics for 60 degrees angle





Rys. 8. Charakterystyka porównawcza dla różnych ilości łopatek zamontowanych w wirniku

Fig. 8. Comparative characteristics for different number of blades mounted on the rotor



Rys. 9. Charakterystyki startowe przeanalizowanych konfiguracji turbiny

Fig. 9. Startup characteristics of the analyzed turbine configuration

#### 4. Wnioski

Charakterystyki przedstawione na rysunkach 2-7 pokazują jak istotny wpływ na pracę badanej turbiny wiatrowej mają zastosowane w wirniku profile łopat oraz kąt ich nachylenia (Pitch Control). Wraz z zwiększaniem kąta nachylenia łopat, moc generowana przez turbinę maleje. Własność tę wykorzystuje się w regulacji mocy oddawanej przez siłownię i dostosowywaniu jej pracy do panujących warunków wietrznych. W zależności od zastosowanego profilu i kąta nachylenia, spadek ten przy prędkości zbliżonej do maksymalnej mierzonej może być kilkukrotny, jak w przypadku analizowanego profilu BP-63, a nawet kilkunastokrotny, tak jak w przypadku modelu z łopatom BP-44. Optymalne właściwości wykazał profil BP-28. Moc generowana przez turbinę z łopatom o tym profilu osiągnęła stosunkowo wysoki poziom, w przybliżeniu 75% mocy dla łopat BP-44, a zwiększanie kąta nachylania dla tego profilu wpływa na zmniejszenie mocy wytwarzanej od kilku do kilkunastu razy. Poznanie zakresu pracy i charakterystyk regulacji mocy oddawanej przez siłownię wiatrową, jest kluczowe w fazie projektowania turbiny. Pozwala to osiągać wysoką sprawność wytwarzania i dużą niezawodność zastosowanych rozwiązań.

Analizując charakterystykę porównawczą przedstawioną na rysunku 8., zauważa się, iż spośród badanych wariantów rozbudowy rotora, wirnik trójpłatowy wykazuje własności najbardziej korzystne spośród badanych. Pomimo tego, że w badanym zakresie prędkości wiatru, wirnik trójpłatowy generuje znacznie niższą moc, w porównaniu do rozwiązań cztero- i sześciopłatowych, jego zaletą jest to, że możliwa jest jego dalsza praca w zakresie pracy znamionowej przy wyższych prędkościach wiatru. Dla wirników z czterema i sześcioma płatomi dalsze zwiększanie prędkości wiatru, mogłoby spowodować uszkodzenie turbiny, ze względu na przekroczenie dopuszczalnej prędkości obrotowej wirnika. Dlatego też w rzeczywistych układach dużych mocy, turbina z wirnikiem trójpłatowym jest najczęściej stosowanym rozwiązaniem, ze względu na szeroki zakres prędkości wiatru, przy których może pracować efektywnie. Turbiny o większej ilości łopat (wolnobieżne) są mniej odporne na silne wiatry, a ich dodatkową wadą jest ich skomplikowana budowa i znacznie większy ciężar, który ma olbrzymie znaczenie w procesie projektowania. Mają one jednak cenną zaletę, jaką jest duży moment rozruchowy, znacznie większy niż dla silników o mniejszej ilości łopat. Model z zamontowanym wirnikiem dwupłatowym charakteryzuje się najszerszym z badanych zakresem pracy, co może być istotną zaletą turbin mających pracować na terenach o silnych i porywistych wiatrach.

Charakterystyki przedstawione na rysunku 9 obrazują przy jakiej prędkości wiatru turbina dla danej konfiguracji wirnika rozpoczyna swój płynny ruch obrotowy, a zatem zaczyna generować energię. Z charakterystyki dla wirnika trójpłatowego, w którym analizowano trzy typy profili zamontowanych łopat, dla trzech kątów ich ustawienia wynika, że dla każdego z badanych kątów natarcia

łopat najszybciej startuje, a więc charakteryzuje się najniższą prędkością startową  $V_s$ , turbina z zamontowanymi profilami BP-28. Dla każdego z analizowanych profili łopat, zauważyć można również, że wartości prędkości startowej dla danej konfiguracji, zależy od kąta natarcia łopat. Im kąt większy, tym prędkość startowa niższa. Analizując zmianę prędkości startowej dla wirników dwu-, trój, cztero-, sześćo-płatowych, można zauważyć, że im większa liczba łopat zamontowanych w rotorze, tym mniejszej prędkości wiatru potrzebuje on do rozpoczęcia pracy.

Każda z przeanalizowanych w artykule konfiguracji badanej turbiny WindPitch™ ma swoje cenne zalety i wyróżnia się jakimś parametrem w stosunku do pozostałych rozwiązań. Dla przykładu duży moment rozruchowy turbiny z wirnikiem o wielu łopatach jest jego ceną i często pożądaną zaletą, jednak, gdy potrzebujemy rozwiązania o szerokim zakresie pracy, z możliwością regulacji mocy oddawanej, słuszniej będzie zastosować wirnik trójpłatowy ze zmiennym kątem ustawienia łopat. Dlatego tak istotne jest poznanie parametrów pracy i charakterystyk turbin wiatrowych oraz metod ich badania, ponieważ są one, jak wspomniano we wstępie, korzystnym i atrakcyjnym źródłem energii, o szerokich możliwościach zastosowania i ogromnym potencjale energetycznym, zarówno w Polsce jak i na Świecie.

## Literatura

- [1] Barzyk G.: Energetyka wiatrowa- podstawy, <http://barzyk.pl/teksty/wyklad1.pdf>
- [2] Dudziak A.: Badanie charakterystyk modelu turbiny wiatrowej, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2015.
- [3] Tytko R.: Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej, Wydawnictwo i Drukarnia Towarzystwa Słowaków w Polsce, Kraków 2013.
- [4] Wolańczyk F.: Elekrownie wiatrowe, Wydawnictwo KaBe Krosno 2009
- [5] Raport TPA Horwath: „Energetyka Wiatrowa w Polsce 2013”

## TESTING BASIC CHARACTERISTICS OF WIND TURBINE MODEL

### Summary

The article presents the process and research results, whose purpose was performance of the main characteristics of the wind turbine model WindPitch™. Construction of model from Horizon Fuel Cell company allows a comprehensive study of physical phenomena associated with the turbine and enables the measurement and calculation of technical parameters as well as determines the operating characteristic for different model configurations. Volatility of the most significant parameter of tested model, meaning generated output power as a function of wind speed, has been measured for different configurations of blades mounted in the rotor. Research analysis refers both to the shape of blades' profile, change of their angle of inclination and their variable number mounted in the rotor. Power generated by the model with installed triple vaned rotor has been studied for angles of 10, 30 and 60 degrees for each of researched profiles, BP-28, BP-44 and BP-63. Moreover, four variants of turbine rotor expansion as been analyzed. The power generated as a function of wind speed is determined for rotors having two,

three, four and six blades and the fixed angle of inclination equal to 10 degrees. For each configuration also was defined the starting speed, and its variation depending on the configuration is shown in the relevant diagrams. Measurements were carried out in the range of wind speed changes, for which the rating parameters of the model operation were not exceeded. Measurement of PE power generated by the turbine was made by indirect technical method, while the speed was determined by the direct method, using a tachometer. Speed of wind has been changed by set of fan and inverter and measured by cup manometers.

**Keywords:** wind, wind energy, wind turbine, power characteristics, WindPitch

DOI: 10.7862/re.2015.2

*Tekst złożono w redakcji:* luty 2015

*Przyjęto do druku:* marzec 2015