

Model mikroturbiny wiatrowej o regulowanym kącie ustawienia łopat

Stanisław Chudzik

Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Aleja Armii Krajowej 17, 42-218 Częstochowa

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki pomiarów, których celem było zbadanie możliwości zwiększenia efektywności działania modelu mikroelektrowni wiatrowej przez zastosowanie zmiennego kąta ustawienia łopat. Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym zbudowanym do realizacji prac nad opracowywanymi wstępnie projektami mikroelektrowni wiatrowych. Stanowisko umożliwia przeprowadzenie pomiarów związanych z doбором optymalnej geometrii śmigła oraz opracowaniem i testowaniem działania algorytmów optymalnego sterowania pracą mikroelektrowni. Omówiono podstawy fizyczne działania turbiny wiatrowej i sposoby optymalnego jej sterowania. Zakres przeprowadzonych badań obejmuje wykonanie pomiarów dla przypadku wybranej geometrii łopaty śmigła z możliwością zmiany jej kąta ustawienia. Jako generator zastosowano prądnicę prądu stałego z obciążeniem o charakterystyce nieliniowej w postaci ogniwa akumulatora Li-Po. Przedstawiono wyniki działania prostego algorytmu sterowania MPPT. Brak układów optymalnego sterowania pracą mikroelektrowni podyktowany jest ogólnym przekonaniem, o wysokich kosztach jego wytworzenia w stosunku do możliwej poprawy efektywności mikroelektrowni. Ponadto stosowane w praktyce sposoby sterowania większymi turbinami wiatrowymi o mocach przekraczających wartość kilkuset kilowatów nie są optymalne dla mniejszych turbin o mocach do 1 kW. Przeprowadzone badania koncentrowały się na określeniu możliwości zastosowania w elektrowniach wiatrowych o mocach do 1 kW, turbin o zmiennym kącie ustawienia łopat w zależności od jej prędkości obrotowej. W większych elektrowniach wiatrowych zmianę kąta ustawienia łopat stosuje się głównie do ograniczenia mocy turbiny przy dużej prędkości wiatru. W mikroelektrowniach wiatrowych takie rozwiązania, ze względów ekonomicznych, nie są stosowane. Jednak zastosowanie prostego mechanizmu zmiany kąta ustawienia łopat w zależności od prędkości obrotowej śmigła może zwiększyć efektywność pracy turbiny w szerszym zakresie prędkości wiatru. Niewielkie wymiary modelu badawczego pozwalają na szybkie i tanie opracowywanie wstępnych prototypów łopat turbiny dzięki możliwości wykorzystania technologii druku 3D.

Słowa kluczowe: mikroelektrownia wiatrowa, stanowisko pomiarowe, kąt ustawienia łopat, sterowanie, optymalizacja

1. Wprowadzenie

Moc projektowanych i budowanych na świecie elektrowni wiatrowych jest stale zwiększana i osiąga wartości rzędu GW. Jest to uzasadnione ekonomicznie gdyż większe turbiny osiągają wyższą efektywność generowanej mocy. Współczesne, komercyjne elektrownie wiatrowe, w większości mają poziomą oś obrotu i trój-

płatową turbinę (koło wiatrowe). Jako generatory stosowane są najczęściej maszyny asynchroniczne klatkowe (IG) i pierścieniowe (DFM) oraz maszyny synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSG) wraz z przekształtnikami energoelektronicznymi i układami sterowania. Współczesne turbiny wiatrowe o poziomej osi obrotu zazwyczaj przystosowane są do pracy przy prędkościach wiatru nie większych niż 25 m/s. Turbiny te osiągają moc znamionową przy prędkościach wiatru mieszczących się w granicach 10–15 m/s. W elektrowniach o mocy do 100 kW stosuje się najczęściej generatory PMSG, zbudowane z magnesów neodymowych, natomiast w większych jednostkach generatory indukcyjne z przekładnią mechaniczną. We współczesnych turbinach wiatrowych stosuje się kilka sposobów regulacji prędkości obrotowej wirnika, i związanej z nią mocą generatora w zależności od chwilowej prędkości wiatru. Do redukcji mocy mechanicznej na wale w turbinach o mocy rzędu MW stosuje się regulację kąta natarcia łopat (ang. *pitch control*), w mniejszych stosuje

Autor korespondujący:

Stanisław Chudzik, chudzik@el.pcz.czyst.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 11.01.2021 r., przyjęty do druku 29.03.2021 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Lampa oświetlenia ulicznego z zasilaniem hybrydowym z odnawialnych źródeł energii [opracowanie własne]
Fig. 1. Street lighting lamp with hybrid power supply from renewable energy sources [own work]

się głównie pasywną regulację przez przeciągnięcie (ang. *passive stall control*) – oderwanie laminarnej strugi powietrza.

Parlament Europejski przyjął dyrektywę 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków, gdzie wprowadzono pojęcie budynku o niemal zerowym zużyciu energii (budynek zeroenergetyczny). Zgodnie z tą dyrektywą, nowo budowane obiekty będą musiały spełniać wymóg, w którym wymagana ilość energii pochodzi w dużym stopniu ze źródeł odnawialnych, w tym ze źródeł zintegrowanych z rozpatrywanym budynkiem. W związku z tym rośnie zainteresowanie mikroelektrowniami wiatrowymi, które uzupełniałyby zapotrzebowanie na energię elektryczną małych gospodarstw domowych. W ofercie wielu producentów można znaleźć mikroelektrownie wiatrowe o mocy nominalnej od 100 W do kilku kW. Takie elektrownie wiatrowe często można zauważyć na małych jachtach, działkach rekreacyjnych i lampach oświetleniowych ulic, gdzie brak jest dostępu do sieci energetycznej (rys. 1).

Zazwyczaj mikroturbiny [1] mają trzy lub więcej łopat o możliwie prostym profilu, łatwym do wykonania i są bezpośrednio osadzone na osi generatora PMSG. Najczęściej napięcie znamionowe generatora jest tak dobrane, aby za pośrednictwem zwykłego prostownika 6D ładował on baterię akumulatorów.

Brak układu optymalnego sterowania pracą takiej mikroelektrowni podyktowany jest na ogół ogólnym przekonaniem o wysokich kosztach jego wytworzenia w stosunku do możliwej poprawy efektywności mikroelektrowni. Ponadto stosowane w praktyce sposoby sterowania większymi turbinami wiatrowymi nie są optymalne dla turbin mniejszych o mocach do 10 kW [2, 3].

W związku z tym autor zaprojektował i wykonał stanowisko badawcze, które umożliwi przeprowadzenie wstępnych badań związanych z doбором optymalnej geometrii śmigła [4] oraz opracowaniem i przetestowaniem działania algorytmu sterowania pracą przetwornicy ładującej akumulator tak, aby optymalnie wykorzystać moc mikroelektrowni [5].

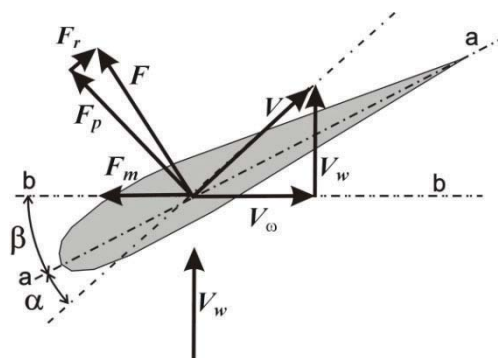
Prezentowane badania koncentrują się głównie na określeniu możliwości zastosowania w mikroelektrowniach wiatrowych turbin o zmiennym kącie nachylenia łopat w zależności od jej prędkości obrotowej. W większych elektrowniach wiatrowych zmianę kąta nachylenia łopat stosuje się głównie do ograniczenia mocy turbiny przy dużej prędkości wiatru. W mikroelektrowniach wiatrowych takie rozwiązania, ze względów ekonomicznych nie są stosowane. Jednak mikroelektrownie wiatrowe są bardzo często sytuowane w miejscach, gdzie warunki wiatrowe są niekorzystne: wysokość od gruntu wynosi do 10 m, przeszkody terenowe ograniczające prędkość strumienia wiatru i wywołujące jego zawrota (rys. 1). Zastosowanie prostego mechanizmu zmiany kąta nachylenia łopat w zależności od prędkości obrotowej śmigła

może zwiększyć efektywność pracy turbiny w szerszym zakresie prędkości wiatru.

Przyjęte wymiary modelu badawczego pozwalają na szybkie i tanie opracowywanie wstępnych prototypów łopat turbiny dzięki możliwości wykorzystania technologii druku 3D.

2. Turbina wiatrowa – działanie

Działanie turbiny wiatrowej zależy od ustawienia kąta natarcia α łopat (rys. 2), jest to kąt między cięciwą łopaty (a-a) a wiatrem pozornym V , będącym sumą wektorów prędkości liniowej łopaty $V_\omega = \omega \cdot r$ i prędkości wiatru V_w . Wartość kąta natarcia α zależy od stosunku prędkości liniowej łopaty V_ω do prędkości wiatru V_w oraz kąta ustawienia łopaty β . Na łopatę turbiny działają dwie siły: nośna F_p – prostopadła do kierunku prędkości wypadkowej V i naporu F_r – zgodna z jej kierunkiem. Ruch obrotowy turbiny powoduje składowa F_m siły wypadkowej F w kierunku ruchu łopaty (b-b). Wartość jej zależy od profilu aerodynamicznego łopaty i jest nieliniową funkcją kąta natarcia. W zakresie wartości kąta natarcia do kilku stopni kątowych, siła ta rośnie w przybliżeniu liniowo, ale od pewnej wartości tego kąta gwałtownie maleje – następuje stan przeciągnięcia [2, 4]. Utrzymanie stałej wartości kąta natarcia, zapewniającej maksymalną sprawność aerodynamiczną, wymaga utrzymania w przybliżeniu stałego stosunku prędkości kątowej wirnika do prędkości wiatru, czyli zmiany prędkości wirnika proporcjonalnie do prędkości wiatru.



Rys. 2. Siły aerodynamiczne na profilu łopaty [opracowanie własne]
Fig. 2. Aerodynamic forces on the blade profile [own work]

Siła nośna generowana przez odcinek płata jest funkcją kąta natarcia na napływający strumień powietrza. Kąt napływu strumienia powietrza zależy od prędkości obrotowej i prędkości wiatru w określonym promieniu. Wymagany kąt skrzywienia łopaty zależy od stosunku prędkości płata w określonym promieniu i pożądanego kąta natarcia płata. Część łopaty przy piasku jest bardziej pochylona pod wiatr ze względu na wysoki stosunek prędkości wiatru do prędkości promieniowej łopaty. W przeciwnieństwie do tego końcówka łopaty będzie prawie prostopadła do kierunku wiatru.

W przypadku łopat o stałym kącie ich ustawienia, można wyznaczyć optymalny kąt skrzywienia łopaty. Jeśli kąt ustawienia łopaty ma być regulowany, kąt skrzywienia łopaty także powinien ulegać zmianie. Zbudowanie śmigła o zmiennej – regulowanej geometrii byłoby zbyt kosztowne i obecnie takich rozwiązań nie stosuje się w praktyce. Dlatego regulacja kąta ustawienia łopat jest stosowana w turbinach o mocy rzędu MW jedynie w celu ograniczenia ich mocy. W przypadku samolotów lub śmigłowców, gdzie śmigło o regulowanym skoku spełnia funkcję napędu, łopaty takich śmigieł mają mały bądź zerowy kąt skrzywienia łopaty – zapewnia to szerszy zakres prędkości dla efektywnej pracy napędu.

Na potrzeby prowadzonych badań wpływu regulacji kąta ustawienia łopat na zakres efektywności pracy mikroelektrowni wiatrowej, wykonano śmigło o prostym profilu i zerowym kącie skreślenia łopaty (rys. 9b).

Właściwości aerodynamiczne turbiny wiatrowej są określone przez współczynnik mocy $C_p(\lambda, \beta)$, który zależy od wyróżnika szybkobieżności λ i kąta położenia łopaty β . Współczynnik λ jest definiowany jako stosunek prędkości liniowej końca łopaty turbiny do prędkości wiatru – gdzie ω_r jest prędkością kątową turbiny, a R jest promieniem turbiny [4].

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_w} \quad (1)$$

Współczynnik mocy, odpowiadający sprawności aerodynamicznej silnika wiatrowego, jest określony wyrażeniem [4]:

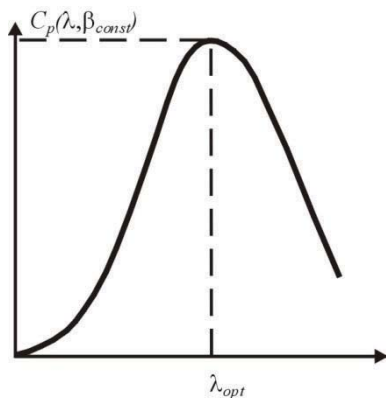
$$C_p = \frac{P_m}{P_w} \quad (2)$$

gdzie P_m jest mocą mechaniczną turbiny, a P_w jest mocą wiatru [4]:

$$P_w = 0,5 \rho \pi R^2 V^3 \quad (3)$$

gdzie ρ jest gęstością powietrza.

Na rys. 3 pokazano przykładową charakterystykę $C_p(\lambda, \beta)$ turbiny wiatrowej dla stałej, wartości kąta β . Maksymalna moc wytwarzana przez turbinę przy danej prędkości wiatru V_w jest osiągana dla maksymalnej wartości współczynnika efektywności odpowiadającego pewnej optymalnej wartości λ_{opt} wyróżnika szybkobieżności.



Rys. 3. Przykładowa charakterystyka C_p w funkcji λ
Fig. 3. An example of the characteristic C_p as a function of λ

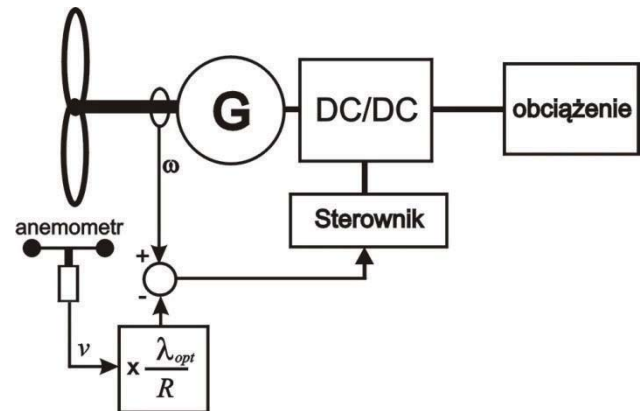
Zależność między mocą mechaniczną turbiny a mocą wyjściową układu elektrycznego P_{out} opisuje równanie (4), gdzie M_t jest momentem tarcia, ω jest prędkością kątową turbiny, J jest momentem bezwładności masy wirującej, η jest ogólną sprawnością elektryczną układu od wejścia generatora do wyjścia falownika [4].

$$P_m = \frac{1}{\eta} P_{out} + \omega M_t + \omega J \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

3. Sposoby optymalnego sterowania pracą turbin wiatrowych

Stosowane algorytmy osiągnięcia mocy maksymalnej MPPT (ang. *Maximum Power Point Tracking*) przez turbiny wiatrowe

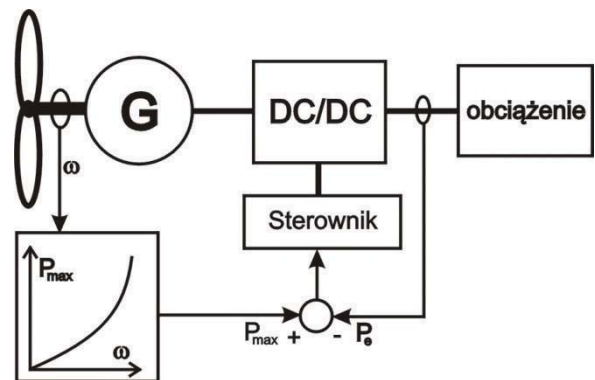
można podzielić na trzy główne metody sterowania: kontrolę wyróżnika szybkobieżności TSR (ang. *tip speed ratio*), kontrolę sygnału mocy sprzężenia zwrotnego PSF (ang. *power signal feedback*) i metodę wyszukiwania maksimum mocy HCS (ang. *hill-climb search*) [6–8]. Metoda sterowania TSR polega na regulacji prędkości obrotowej turbiny wiatrowej w celu utrzymania optymalnej wartości wyróżnika szybkobieżności, przy której osiągnięta moc turbiny jest największa. Metoda ta, wymaga zmierzenia lub oszacowania zarówno prędkości wiatru, jak i prędkości obrotowej turbiny, a także wymaga znajomości charakterystyki optymalnego wyróżnika szybkobieżności dla zaprojektowanej turbiny (rys. 4).



Rys. 4. Kontrola wyróżnika szybkobieżności λ_{opt} [opracowanie własne]

Fig. 4. Control of the tip-speed ratio [own work]

Metoda sterowania PSF oparta jest na wyznaczonej w badaniach prototypu charakterystyki mocy maksymalnej turbiny wiatrowej i śledzeniu tej krzywej za pomocą systemu kontrolno-pomiarowego. Krzywe mocy maksymalnej należy uzyskać w trakcie symulacji lub eksperymentów na odłączonej turbiny wiatrowej. W tej metodzie moc odniesienia jest wyznaczana za pomocą zarejestrowanej charakterystyki mocy maksymalnej lub równania mocy turbiny wiatrowej, gdzie jako prędkość wejściową stosuje się prędkość wiatru lub prędkość wirnika (rys. 5).

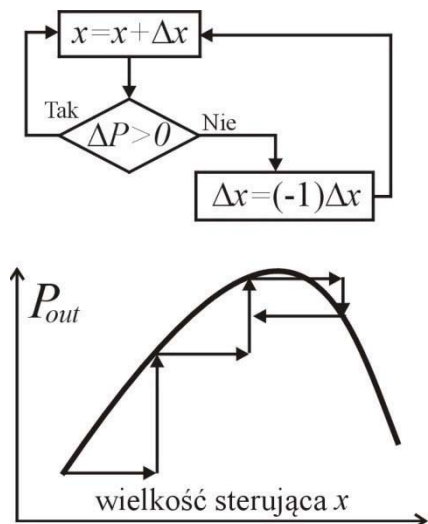


Rys. 5. Kontrola sygnału mocy sprzężenia zwrotnego – PSF [opracowanie własne]

Fig. 5. Control of the feedback power signal – PSF [own work]

Działanie algorytmu sterowania HCS polega na ciągłym poszukiwaniu mocy szczytowej turbiny wiatrowej (rys. 6). Algorytm śledzenia, w zależności od położenia punktu pracy i zależności między zmianami mocy i prędkości obrotowej turbiny, oblicza optymalny sygnał w celu doprowadzenia elektrowni wiatrowej do punktu maksymalnej mocy. Niestety sterowanie HCS może działać dobrze tylko wtedy, gdy moment bezwładności turbiny wiatrowej jest bardzo mały, czyli zmiana prędkości turbiny następuje niemal „natychmiastowo” na zmianę prędkości

wiatru. W przypadku turbin wiatrowych o większej bezwładności, chwilowa moc wyjściowa elektrowni jest związana z mocą mechaniczną turbiny i zmianami energii kinetycznej zmagazynowanej w elementach wirujących, co często powoduje, że metoda HCS jest nieskuteczna. Sterowanie HCS nie osiąga maksymalnych punktów mocy przy szybkich wzrostach prędkości wiatru oraz powoduje tzw. „przeciągnięcie” przy spadkach prędkości wiatru, co poważnie ogranicza użyteczność tej metody dla turbin wiatrowych.



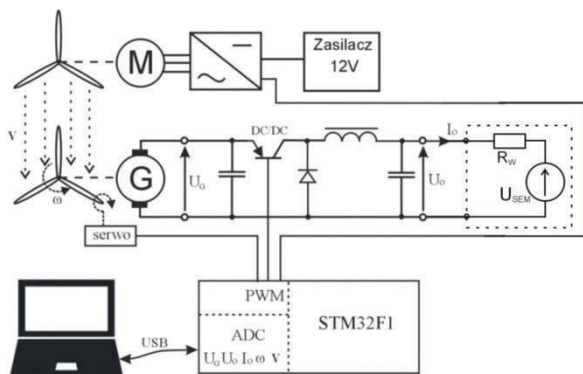
Rys. 6. Idea działania algorytmu HCS [opracowanie własne]
Fig. 6. The idea of operation of the HCS algorithm [own work]

W związku z powyższym uzasadnione jest prowadzenie badań nad opracowaniem metody sterowania maksymalnego wydatku mocy dla mikroturbin wiatrowych, która nie wymaga pomiaru prędkości wiatru i prędkości wirnika turbiny, jest niezależna od charakterystyki systemu i ma zastosowanie do małych turbin wiatrowych.

4. Stanowisko badawcze

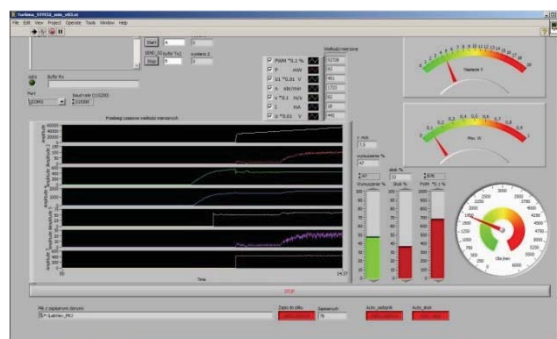
Na potrzeby przeprowadzenia badań modelu mikroelektrowni wiatrowej zbudowano stanowisko badawcze. Na rys. 7 przedstawiono schemat poglądowy stanowiska.

W skład stanowiska badawczego wchodzi wirtualny przyrząd pomiarowo-sterujący zaimplementowany na komputerze klasy PC oraz fizyczny model miniaturowego tunelu aerodynamicznego. Wirtualny przyrząd pomiarowo-sterujący został utworzony w środowisku programistycznym LabVIEW. Na



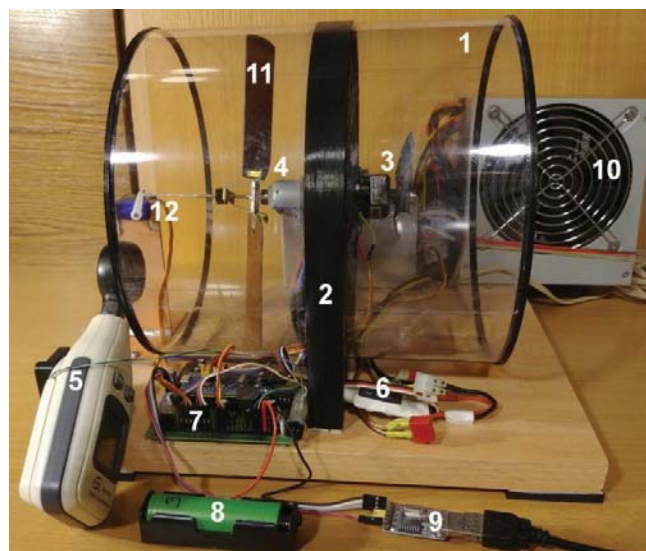
Rys. 7. Schemat poglądowy stanowiska do badań modelu mikroelektrowni wiatrowej
Fig. 7. The scheme of the stand for testing the model of a wind power plant

rysunku 8 przedstawiono widok panelu czołowego. Przyrząd ma możliwość zadawania wartości wyjściowej mocy wentylatora, wartości współczynnika wypełnienia fali PWM dla przetwornicy DC/DC, wartości skoku śmigła turbiny wiatrowej. Ponadto przyrząd wyświetla i rejestruje następujące wartości mierzone: prędkość wiatru v , prędkość obrotową turbiny n , napięcie wyjściowe generatora U_G , napięcie wyjściowe przetwornicy DC/DC U_O i prąd odbiornika (obciążenia) I_O . Wyznaczana jest także moc dostarczana do odbiornika P_O .

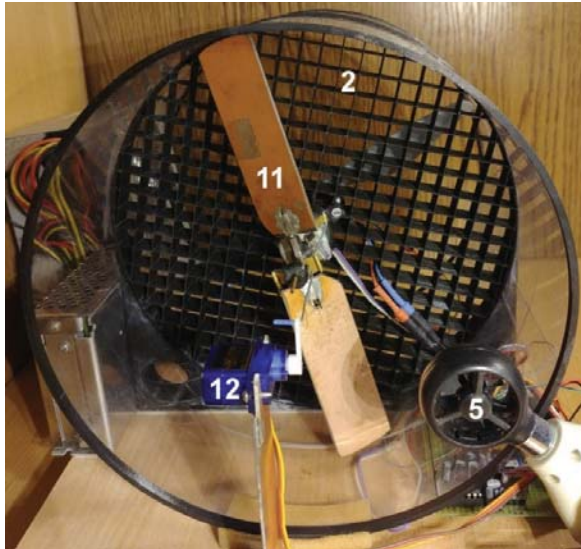


Rys. 8. Widok panelu czołowego wirtualnego przyrządu pomiarowo-sterującego
Fig. 8. View of the front panel of the virtual measurement and control device

Wykonany model tunelu aerodynamicznego (rys. 9a, 9b) składa się z rury tunelu (1) umocowanej w ramie (2), która jednocześnie spełnia rolę ułownicy (prostownicy strumienia powietrza). Do ramy przymocowano bezszczotkowy silnik BLDC wentylatora (3) ze śmigłem o średnicy 203 mm (8 cali) i skoku 101 mm (4 cale) oraz silnik szczotkowy prądu stałego (4) ze wzbudzeniem magnesami stałymi, pełniący funkcję prądnicy prądu stałego. Prądnica napędzana jest śmigłem pełniącym funkcję turbiny wiatrowej. Przy wlocie tunelu umieszczony jest czujnik anemometru (5) mierzący prędkość wiatru (strumienia powietrza). Silnik BLDC wentylatora zasilany jest z falownika trójfazowego (6). Model badawczy posiada wykonany sterownik (7) oparty na 32-bitowym mikrokontrolerze STM32F1, który steruje pracą wentylatora, przetwornicy DC/DC oraz serwomechanizmu (12) skoku śmigła turbiny (11). Sterownik dokonuje także pomiarów prędkości wiatru v , prędkości obrotowej turbiny ω , napięcia wyjściowego prądnicy U_G oraz napięcia wyjściowego przetwornicy U_O i prądu I_O na jej obciążeniu (8). Sterownik



Rys. 9a. Widok modelu badawczego
Fig. 9a. View of the research model



Rys. 9b. Widok tunelu aerodynamicznego
Fig. 9b. Wind tunnel view

poprzez interfejs szeregowy USB (9) komunikuje się z komputerem nadrzędnym, na którym uruchomiony jest program wirtualnego przyrządu pomiarowo-sterującego. Model zasilany jest z zasilacza (10) o napięciu 12 V.

Dzięki niewielkim rozmiarom modelu, niektóre jego elementy można było wytworzyć korzystając z drukarki 3D.

5. Wyniki pomiarów

Wirtualny przyrząd pomiarowo-sterujący umożliwia automatyczną rejestrację wartości wielkości mierzonych dla dziesięciu zadanych wartości mocy wentylatora i stu zadanych wartości współczynnika wypełnienia fali PWM dla klucza przetwornicy DC/DC (ang. *buck converter*). Dzięki takiemu rozwiązaniu otrzymuje się macierz 1000 wartości dla każdej wielkości mierzonej bez konieczności fizycznego angażowania osoby prowadzącej pomiary w rejestrację danych.

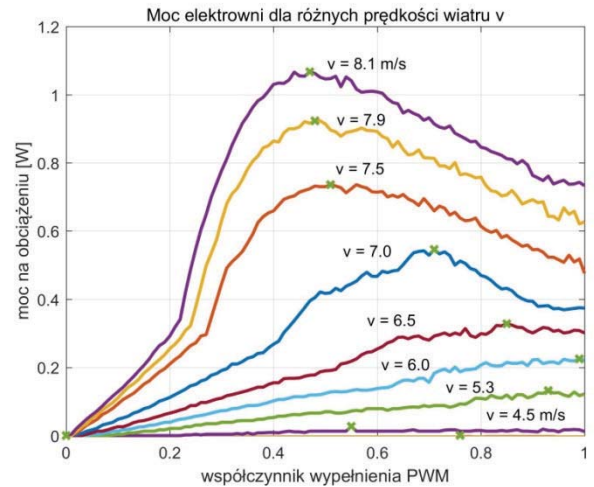
Ponadto przyrząd pomiarowo-sterujący ma możliwość automatycznej regulacji kąta ustawienia łopatek w przyjętej zależności funkcyjnej od zmierzonej chwilowej prędkości obrotowej turbiny $\beta = f(n)$. Docelowo, w rozwiązaniu praktycznym mikroturbiny przewiduje się możliwie proste i tanie rozwiązanie mechaniczne, wykorzystujące siłę odśrodkową wirującej masy, które zmieniałoby kąt ustawienia łopatek.

Optymalne sterowanie elektrownią polega na osiągnięciu mocy maksymalnej dla danej wartości prędkości wiatru. Sterowanie mocą, w tym rozwiązaniu układowym elektrowni, odbywa się przez zmianę współczynnika wypełnienia fali PWM sterującej pracą klucza w prostej przetwornicy DC/DC, co ma bezpośredni wpływ na wartość napięcia wyjściowego przetwornicy. W przeprowadzonych badaniach wykonano pomiary dla obciążenia odbiornikiem o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej, jakim jest ogniwo akumulatora litowo-polimerowego. Siła elektromotoryczna U_{SEM} użytego ogniwa w zależności od stanu naładowania zawierała się w przedziale 3,3–4,3 V, a wyznaczona jego rezystancja wewnętrzna wynosiła $R_w \approx 0,25 \Omega$.

Na rysunku 10 przedstawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych badań charakterystyki mocy osiąganego na wyjściu elektrowni wiatrowej o stałym kącie ustawienia łopatek $\beta = 15^\circ$ w funkcji wartości współczynnika wypełnienia fali PWM (wielkość sterująca) dla różnych prędkości wiatru. Natomiast na rys. 11 przedstawiono charakterystyki mocy osiąganego na wyjściu elektrowni wiatrowej o regulowanym kącie ustawienia

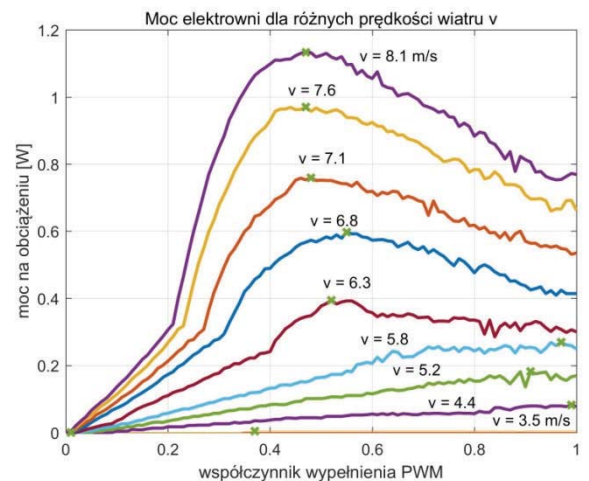
łopatek β w zależności od prędkości obrotowej n [obr./min] turbiny $\beta(n) = 30^\circ - n/150$, w funkcji wartości współczynnika wypełnienia fali PWM dla różnych prędkości wiatru.

Warto zauważyć, że dla obciążenia nieliniowego, jakim jest ogniwo Li-Po optymalna praca elektrowni wymaga szerszego zakresu wartości wielkości sterującej PWM zawartej w przedziale 0,45–0,95. Należy tu dodatkowo wziąć pod uwagę zmiany napięcia U_{SEM} ogniwa w zależności od stopnia jego naładowania.



Rys. 10. Charakterystyki mocy osiąganego na wyjściu elektrowni wiatrowej o stałym kącie nachylenia łopatek, w funkcji wartości sterującej – współczynnika wypełnienia fali PWM, dla różnych prędkości wiatru

Fig. 10. Characteristics of the power achieved at the output of a wind turbine with a constant blade pitch angle as a function of the control value – PWM, for different wind speeds

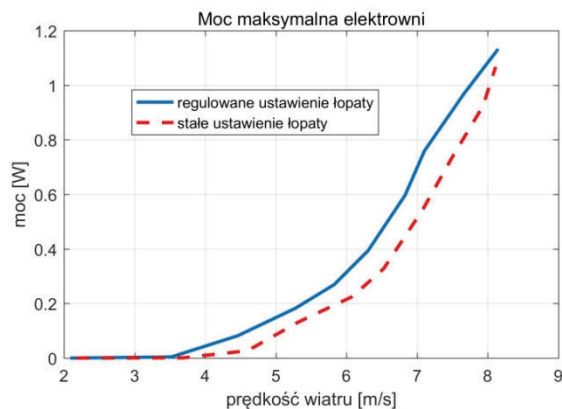


Rys. 11. Charakterystyki mocy osiąganego na wyjściu elektrowni wiatrowej o regulowanym kącie ustawienia łopatek, w funkcji wartości sterującej – współczynnika wypełnienia fali PWM, dla różnych prędkości wiatru

Fig. 11. Characteristics of the power achieved at the output of a wind turbine with an adjustable blade angle as a function of the control value – PWM, for different wind speeds

Na rysunku 12 przedstawiono otrzymane dwie charakterystyki osiąganego mocy maksymalnej elektrowni w funkcji prędkości wiatru dla przypadku stałego $\beta = const$ i regulowanego $\beta = f(n)$ ustawienia łopatek turbiny. Można zauważyć, że dla przypadku regulowanego efektywność elektrowni jest większa. W przeprowadzonym eksperymencie, turbina osiąga wartość wyróżnika szybkobieżności $\lambda \approx 10$ – płyty turbiny są ustawione prawie prostopadle do kierunku wiatru. Biorąc dodatkowo pod uwagę tarcie statyczne łożysk i szczotek oraz moment zaczepowy wyni-

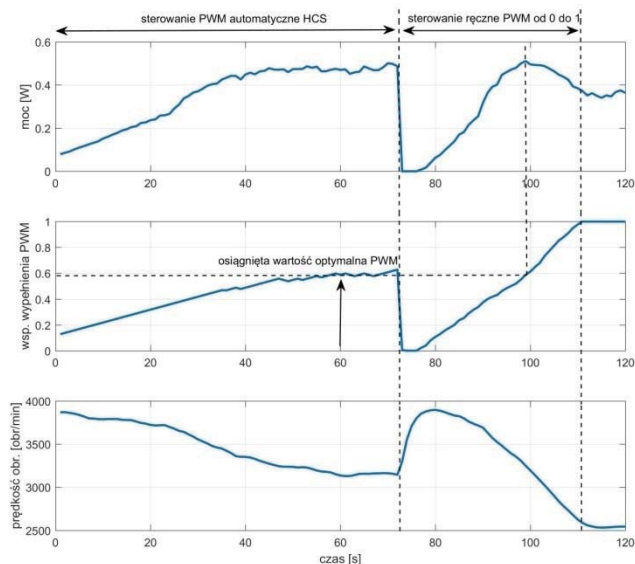
kający ze zmian reluktancji obwodu magnetycznego prądnicy, rozruch takiej turbiny jest bardzo utrudniony i następuje dopiero przy stosunkowo dużej prędkości wiatru równej 4 m/s, w porównaniu do prędkości wiatru równej 1,5 m/s, przy której następuje jej zatrzymanie. Regulacja kąta ustawienia łopatek może znacznie ułatwić rozruch turbiny wiatrowej i umożliwić jej pracę przy mniejszej prędkości wiatru. Ponadto przez odpowiedni dobór zależności $\beta = f(n)$ można także ograniczyć maksymalną prędkość obrotową turbiny przy której $\beta(n_{max}) = 0$.



Rys. 12. Charakterystyki mocy maksymalnej elektrowni wiatrowej w funkcji wartości prędkości wiatru dla przypadku stałego i regulowanego ustawienia łopatek turbiny

Fig. 12. Characteristics of the maximum power of a wind turbine as a function of the wind speed value for the case of a constant and controlled setting of the turbine blades

Wyniki pomiarów wskazują, że często stosowane w mikroelektrowniach, bezpośrednie podłączenie akumulatora do prądnicy, którego charakterystyka ładowania jest silnie nieliniowa i zmienia się w zależności od stopnia naładowania akumulatora, może być przyczyną gorszej efektywności pracy mikroelektrowni. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie prostej przetwornicy, która w określony sposób mogłaby kształtować charakterystykę obciążenia mikroelektrowni.



Rys. 13. Przebiegi czasowe: mocy elektrowni wiatrowej, wartości współczynnika wypełnienia PWM, i prędkości obrotowej turbiny, dla pracy modelu mikroelektrowni wiatrowej sterowanej prostym algorytmem HCS dla regulowanego ustawienia łopatek turbiny

Fig. 13. Time charts of: wind farm power, PWM duty cycle, and turbine rotational speed, for the operation of the wind micro power plant model controlled by a simple HCS algorithm for the adjustable turbine blade setting

Przeprowadzono badania dla pracy modelu mikroelektrowni wiatrowej, sterowanej prostym algorytmem HCS (rys. 6). Na rys. 13 przedstawiono wybrane wyniki eksperymentu w postaci przebiegów czasowych: mocy elektrowni wiatrowej, wartości współczynnika wypełnienia PWM, i prędkości obrotowej turbiny. Wyniki otrzymano przy stałej prędkości wiatru $v = 6,5$ m/s.

Otrzymane wyniki eksperymentu wykazują możliwość wykorzystania prostego algorytmu HCS do sterowania pracą mikroelektrowni wiatrowej jedynie dla stabilnej wartości prędkości wiatru. W przypadku szybkich i większych spadków prędkości wiatru, prezentowany prosty algorytm HCS nie działa już optymalnie, doprowadzając w skrajnych warunkach do znacznego spadku prędkości obrotowej turbiny i ponownego jej rozruchu. Nieznaczna poprawa działania można w tym przypadku osiągnąć przez zastosowanie prostego mechanizmu regulacji kąta ustawienia łopatek $\beta = f(n)$, który zapobiega nagłemu „przeciągnięciu” i ułatwia rozruch turbiny. Pewną poprawę można także osiągnąć, jeśli w algorytmie sterowania wprowadzi się dodatkowe działania związane z pomiarem chwilowej prędkości obrotowej turbiny.

6. Wnioski

Otrzymane wyniki pomiarów wykazały, że bezpośrednie podłączenie akumulatora do prądnicy może być przyczyną gorszej efektywności pracy mikroelektrowni. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie prostej przetwornicy, która w określony sposób będzie kształtować charakterystykę obciążenia mikroelektrowni. Możliwość zmiany kąta ustawienia łopatek turbiny wiatrowej w zależności od jej prędkości obrotowej daje pewną poprawę efektywności mikroelektrowni. W wykonaniu praktycznym należy jednak wziąć pod uwagę dodatkowe koszty wykonania mechanizmu zmiany ustawienia łopatek oraz jego niezawodność przy trudnych warunkach środowiskowych związanych z oblodzeniem. Zastosowanie prostego mechanizmu zmiany ustawienia łopatek może być korzystne dla dwułopatowych mikroelektrowni o dużym współczynniku szybkobieżności. Rezygnując z trzeciej łopaty w turbinie wiatrowej na rzecz mechanizmu zmiany ustawienia łopatek można osiągnąć większą szybkobieżność turbiny, a przez to można zastosować generator o mniejszej liczbie par biegunów – to z kolei przekłada się na jego niższe koszty wykonania. Zastosowany w modelu silnik szczotkowy prądu stałego z magnesami trwałymi jako prądnica wykazał swoją przydatność. Dodatkowe opory ruchu, jakie wnoszą szczotki, nie powodowały znaczących ograniczeń przy mniejszych prędkościach wiatru. Wyniki badań wykazały, że w ramach recyklingu można wykorzystać w mikroelektrowniach wiatrowych silniki prądu stałego stosowane w wentylatorach chłodnic ze złomowanych samochodów. Zastosowanie w tym przypadku prostej przetwornicy DC/DC umożliwiłoby optymalne dopasowanie mocy charakterystyki odbiornika do charakterystyki prądnicy. Przeprowadzone badania wykazały, że zbudowany model mikroelektrowni wiatrowej pozwala zaobserwować i zmierzyć zjawiska fizyczne związane z aerodynamiką turbiny wiatrowej i działaniem generatora prądu elektrycznego. Wyniki badań, w których stosowane są jedynie uproszczone modele matematyczne turbiny wiatrowej, często nie uwzględniają zjawiska tzw. „przeciągnięcia”, które jest znaczące, gdy maksymalna moc turbiny wiatrowej dla danej prędkości wiatru zostanie przekroczona. Model w prezentowanej skali pozwala w szybki i tani sposób wykonywać i badać wstępne prototypy projektowanych śmigieł z wykorzystaniem popularnych drukarek 3D. Ponadto stanowisko to umożliwia implementację, w pamięci programu użytego mikrokontrolera STM32F1, opracowywanych algorytmów optymalnego sterowania mikroelektrownią wiatrową. Moc obliczeniowa 32-bitowego mikrokontrolera jest wystarczająca nawet dla bardziej złożonych algorytmów. Specyfika działa-

nia, budowy i ograniczeń dla mikroelektrowni wiatrowych jest w pewnych aspektach zupełnie inna niż w przypadku większych elektrowni wiatrowych, dla których powstały już liczne opracowania naukowe [6–9]. Z uwagi na rosnący popyt na autonomiczne i przenośne mikroelektrownie hybrydowe, łączące panele fotowoltaiczne i turbiny wiatrowe, celowe jest prowadzenie badań nad poprawą efektywności energetycznej tych urządzeń. Dalesze prace będą koncentrować się na wykorzystaniu generatora synchronicznego z magnesami trwałymi PMSG [10], rozruchem mikroturbiny wiatrowej o współczynniku szybkobieżności osiągniętym wartość 10 i algorytmami optymalnego sterowania MPPT mikroelektrownią.

Bibliografia

1. Bukala J., Damaziak K., Krzeszowiec M., Malachowski J., *Rozwiązania konstrukcyjne małych turbin wiatrowych*, „Modelowanie inżynierskie”, T. 22, Nr 53, 2014, 21–29.
2. Krzeziński Z., Szewczyk J., Bogalecka E., *Sterowanie małą elektrownią wiatrową z wykorzystaniem efektu przeciągnięcia*, „Przegląd Elektrotechniczny”, R. 94, Nr 5, 2018, 104–111, DOI: 10.15199/48.2018.05.19.
3. Błasiński W., *Symulator turbiny wiatrowej małej mocy*, „Przegląd Elektrotechniczny”, R. 93, Nr 12, 2017, 263–265, DOI: 10.15199/48.2017.12.62.
4. Schubel P., Crossley R., *Wind turbine blade design*, „Energies”, Vol. 5, No. 9, 2012, 3425–3449, DOI: 10.3390/en5093425.
5. Rolak M., Kot R., Malinowski M., Goryca Z., Szuster J., *AC/DC converter with maximum power point tracking algorithm for complex solution of small wind turbine*, „Przegląd Elektrotechniczny”, R. 87, Nr 6, 2011, 91–96.
6. Zammit D., Spiteri Staines C., Micallef A., Apap M., *MPPT with Current Control for a PMSG Small Wind Turbine in a Grid-Connected DC Microgrid*, ed. Battisti L., Ricci M., *Wind Energy Exploitation in Urban Environment*, Springer International Publishing, 2018, 205–219, DOI: 10.1007/978-3-319-74944-0_14.
7. Kadri A., Marzougui H., Bacha F., *MPPT control methods in wind energy conversion system using DFIG*, 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), Hammamet, 2016, 1–6, DOI: 10.1109/CEIT.2016.7929115.
8. Shankareppagol L., Hampannavar S., Doadamani S., *Performance Analysis of P&O and INC MPPT for WECS*, 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Pune, 2018, 1–8, DOI: 10.1109/I2CT.2018.8529555.
9. Baran J., Jąderko A., *Sterowanie turbiną wiatrową z odtwarzaniem momentu aerodynamicznego*, „Przegląd Elektrotechniczny”, R. 94, Nr 5, 2018, 47–52, DOI: 10.15199/48.2018.05.08.
10. Gajewski P., Pieńkowski K., *Control of a variable speed wind turbine system with PMSG generator*, „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe”, Nr 107, 2015, 75–80.

Model of a Wind Turbine with Variable Blade Angle

Abstract: The article presents the results of research into the operation of a model of a wind micropower plant with a variable blade angle. The research was carried out on a miniature model of a measuring stand built for the purpose of carrying out work on pre-developed projects of wind micro power plants. The stand allows to carry out measurements related to the selection of the optimal propeller geometry, as well as the development and testing of algorithms for optimal control of the micropower plant. The physical basics of wind turbine operation and the methods of its optimal control are presented. The results of the performed measurements for the selected propeller blade geometry with the possibility of changing its setting angle are presented. A DC generator with a load with a non-linear characteristic in the form of a Li-Po battery cell was used. The results of operation of a simple MPPT control algorithm are presented. The lack of optimal control systems for the operation of micropower plants is dictated by the general belief that the costs of its production are high in relation to the possible improvement of the efficiency of micropower plants. Moreover, the practical methods of controlling larger wind turbines are not optimal for small and very small turbines. The conducted research focused on determining the possibility of using turbines with variable blade angles depending on its rotational speed. In larger wind farms, changing the blade angle is mainly used to limit the power of the turbine at high wind speeds. In micro wind power plants such solutions are not used for economic reasons. However, the use of a simple mechanism for changing the angle of the blades depending on the rotational speed of the propeller can increase the efficiency of the turbine in a wider range of wind speeds. The small dimensions of the research model allow for quick and cheap development of preliminary prototypes of turbine blades thanks to the possibility of using 3D printing technology.

Keywords: collision avoidance, evasive manoeuvre, flight control, numerical simulation

dr hab. inż. Stanisław Chudzik

chudzik@el.pcz.czest.pl

ORCID: 0000-0002-8433-0247

Profesor uczelni w Katedrze Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki Politechniki Częstochowskiej. Jego zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia związane z metrologią elektryczną wielkości nieelektrycznych, szczególnie w zakresie zjawisk dyfuzji ciepła, projektowaniem mikroprocesorowych systemów pomiarowych i pomiarowo-sterujących, pomiarami termowizyjnymi, analizą metrologiczną dokładności pomiarów.

