

Stanowisko pomiarowe do testowania modeli mikroelektrowni wiatrowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono miniaturowy model stanowiska pomiarowego do badań wstępnych projektów mikroelektrowni wiatrowych. Stanowisko umożliwia przeprowadzenie pomiarów związanych z doбором optymalnej geometrii śmigła, oraz z opracowaniem i testowaniem działania algorytmów optymalnego sterowania pracą mikroelektrowni. Przedstawiono wyniki pomiarów dla wybranej geometrii śmigła, wykorzystaniu prądnicy prądu stałego i odbiornika o charakterystyce liniowej i nieliniowej. Przedstawiono wyniki działania prostego algorytmu sterowania MPPT.

Abstract. The article presents a miniature model of the stand for preliminary research of micro wind farm projects. 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 micro power plant operation. The results of measurements for selected propeller geometry with the use of a DC generator and loads with linear and non-linear characteristics are presented. The results of the operation of a simple MPPT control algorithm are presented. (**Measuring stand for testing models of micro wind power plant**).

Słowa kluczowe: mikroelektrownia wiatrowa, stanowisko pomiarowe, sterowanie, optymalizacja.

Keywords: wind micro-power plant, measuring stand, control, optimization.

Wstęp

Obecnie na świecie, w ofercie wielu producentów, można znaleźć mikroelektrownie wiatrowe o mocy nominalnej od 100 W do kilku kW. Mogą one uzupełniać zapotrzebowanie na energię elektryczną małych gospodarstw domowych. Miniaturowe elektrownie wiatrowe często montowane są na niedużych jachtach, działkach rekreacyjnych i lampach oświetleniowych ulic, gdzie brak jest dostępu do sieci energetycznej.

Zazwyczaj takie mikroturbiny [1] posiadają trzy, bądź więcej łopatek 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 małych i bardzo małych turbin [2, 3].

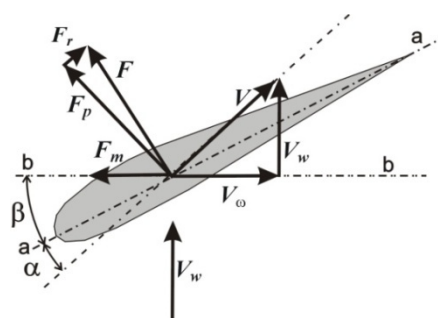
W związku z tym autor zaprojektował i wykonał małe stanowisko badawcze które umożliwia przeprowadzenie wstępnych badań związanych z doбором optymalnej geometrii śmigła [4], oraz opracowanie i przetestowanie działania algorytmu sterowania pracą prostej przetwornicy ładującej akumulator tak, aby możliwie optymalnie wykorzystywać moc mikroelektrowni [5].

Działanie turbiny wiatrowej

Działanie turbiny wiatrowej zależy od ustawienia kąta natarcia α łopatek – rysunek 1, i jest to kąt pomiędzy 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 łopatkę 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 małych wartości kąta natarcia siła ta rośnie w przybliżeniu liniowo, ale od pewnej wartości tego kąta gwałtownie maleje – następuje stan przeciągnięcia [2, 4].



Rys. 1. Siły aerodynamiczne na profilu łopaty

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

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

gdzie: ω_r jest prędkością kątową turbiny, a R jest promieniem turbiny.

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

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

gdzie P_m jest mocą mechaniczną turbiny, a P_w jest mocą wiatru:

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

gdzie ρ jest gęstością powietrza.

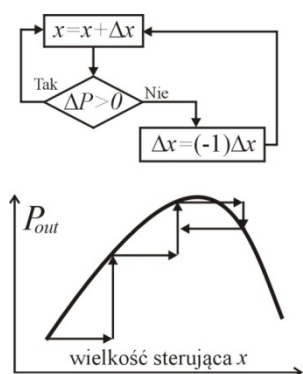
Zależność między mocą mechaniczną turbiny a mocą wyjściową układu elektrycznego P_{out} opisuje równanie (4), gdzie: M_t jest momentem tarcia, ω jest prędkością kątową turbiny, J jest momentem bezwładności masy wirującej, η jest ogólną sprawnością elektryczną układu od wejścia generatora do wyjścia falownika.

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

Sposoby optymalnego sterowania pracą turbin wiatrowych

Stosowane algorytmy osiągnięcia mocy maksymalnej (maximum power point tracking - MPPT) przez turbiny wiatrowe można podzielić na trzy główne metody sterowania: kontrolę wyróżnika szybkobieżności (tip speed ratio - TSR), kontrolę sygnału mocy sprzężenia zwrotnego (power signal feedback - PSF) i metodę wyszukiwania maksimum mocy (hill-climb search - HCS) [6, 7, 8].

Metoda sterowania TSR reguluje prędkość obrotową turbiny wiatrowej w celu utrzymania optymalnej wartości wyróżnika szybkobieżności, przy której osiągana 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. 2. Idea działania algorytmu HCS

W metodzie sterowania PSF wymagana jest znajomość krzywej mocy maksymalnej turbiny wiatrowej i śledzenie tej krzywej za pomocą systemu kontrolno - pomiarowego. Krzywe mocy maksymalnej należy uzyskać poprzez symulację lub eksperymenty na odłączonej turbinie 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 .

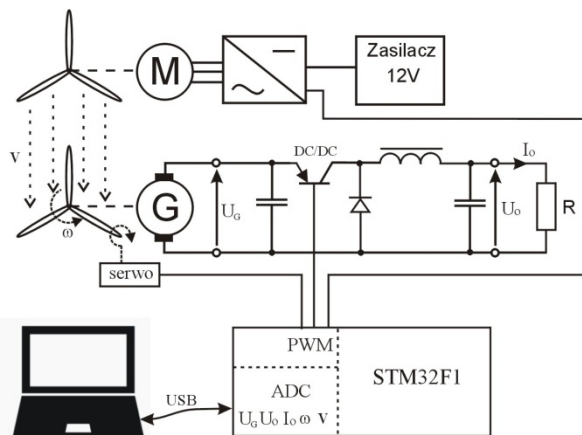
Algorytm sterowania HCS stale poszukuje mocy szczytowej turbiny wiatrowej – rysunek 2. Algorytm śledzenia, w zależności od położenia punktu pracy i zmian mocy, oblicza optymalny sygnał w celu doprowadzenia elektrowni wiatrowej do punktu maksymalnej mocy. W przypadku turbin wiatrowych o większej bezwładności, chwilowa moc wyjściowa elektrowni jest związana z mocą mechaniczną turbiny i zmianami energii kinetycznej zgromadzonej w elementach wirujących [9], co często powoduje, że metoda HCS jest nieskuteczna.

Jest zatem wysoce pożądane opracowanie metody maksymalnego wydatku mocy dla turbin wiatrowych, która nie wymaga pomiaru prędkości wiatru i prędkości wirnika turbiny, jest niezależna od charakterystyki systemu i ma zastosowanie do małych mikroelektrowni wiatrowych.

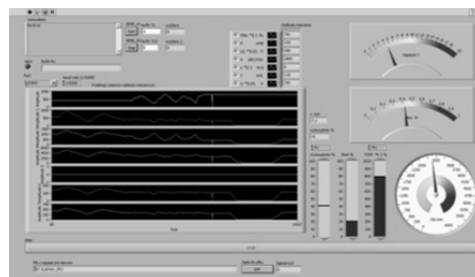
Stanowisko badawcze

Na potrzeby przeprowadzenia badań modelu mikroelektrowni wiatrowej zbudowano małe stanowisko badawcze. Na rysunku 3 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 stworzony w środowisku programistycznym LabView. Na rysunku 4

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 ω , 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 .

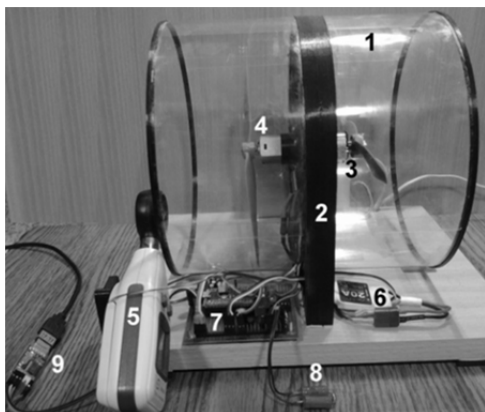


Rys. 3 Schemat poglądowy stanowiska do badań modelu mikroelektrowni wiatrowej



Rys. 4 Widok panelu czołowego wirtualnego przyrządu pomiarowo-sterującego

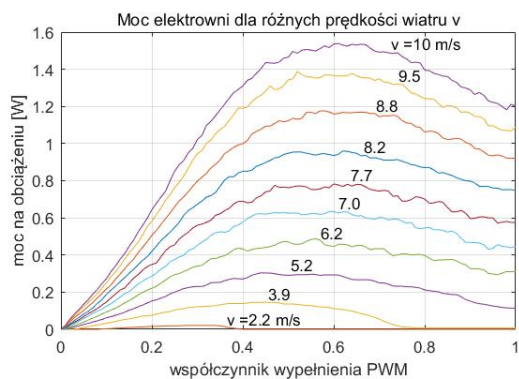
Wykonany model tunelu aerodynamicznego, przedstawiony na rysunku 5, składa się z rury tunelu (1) umocowanej w ramie (2) która jednocześnie spełnia rolę ułownicy (prostownicy strumienia powietrza). Do ramy przymocowano bezszczotkowy silnik BLDC wentylatora (3) ze śmigłem o średnicy 203mm (8 cali) i skoku 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 serwo mechanizmu skoku śmigła turbiny. 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 poprzez interfejs szeregowy USB (9) komunikuje się z komputerem nadrzędnym na którym uruchomiony jest program wirtualnego przyrządu pomiarowo-sterującego. Dzięki niewielkim rozmiarom modelu, niektóre jego elementy można było wytworzyć korzystając z drukarki 3D.



Rys. 5 Widok modelu badawczego

Wyniki pomiarów

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



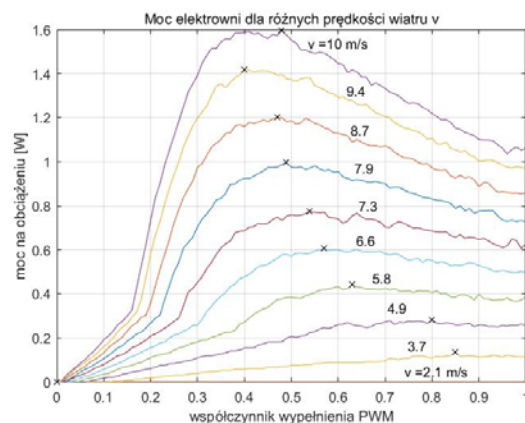
Rys. 6 Charakterystyki mocy osiągniętej na wyjściu elektrowni wiatrowej dla obciążenia liniowego, w funkcji wartości sterującej - współczynnika wypełnienia fali PWM, dla różnych prędkości wiatru

Optymalne sterowanie elektrownią polega na osiągnięciu mocy maksymalnej dla danej wartości prędkości wiatru. Sterowanie mocą, w tym rozwiązaniu układowym elektrowni, odbywa się poprzez 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 rezystancyjnego – odbiornik o liniowej charakterystyce prądowo-napięciowej oraz dla odbiornika o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej jakim jest ogniwo akumulatora litowo-polimerowego. Siła elektromotoryczna SEM użytego ogniwa w zależności od stanu naładowania zawierała się w przedziale (3,3 ÷ 4,2)V a wyznaczona jego rezystancja wewnętrzna wynosiła $\approx 0,25 \Omega$.

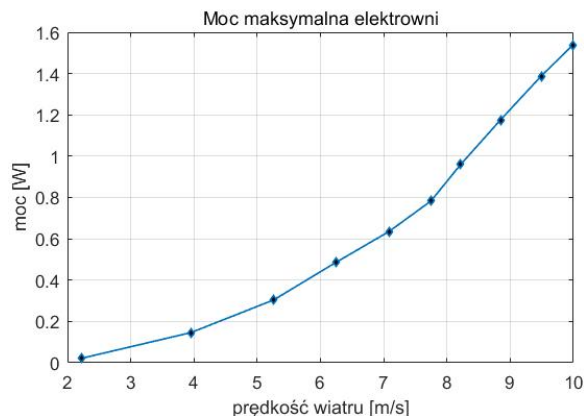
Przykładowe charakterystyki mocy osiągniętej na wyjściu elektrowni wiatrowej dla obciążenia rezystancyjnego w funkcji wartości współczynnika wypełnienia fali PWM (wielkość sterująca) dla różnych prędkości wiatru przedstawiono na rysunku 6. Warto zauważyć, że dla obciążenia liniowego jakim jest rezystor optymalna praca elektrowni dla większych wartości wiatru jest osiągana dla wąskiego przedziału wartości współczynnika wypełnienia

PWM (0,50 ÷ 0,65). Ograniczenie mocy elektrowni w tym przypadku wynika głównie ze stosunkowo dużej wartości rezystancji uzwojenia prądnicy. Dla mniejszych prędkości wiatru, ograniczenie mocy elektrowni, wynika z małej wartości mocy mechanicznej, osiągniętej przez turbinę wiatrową (śmigło), która jest przekazywana na wał prądnicy.

Przykładowe charakterystyki mocy osiągniętej na wyjściu elektrowni wiatrowej dla obciążenia w postaci ogniwa akumulatora Li-Po w funkcji wartości współczynnika wypełnienia fali PWM (wielkość sterująca) dla różnych prędkości wiatru przedstawiono na rysunku 7. Warto zauważyć, że dla obciążenia nieliniowego jakim jest ogniwo Li-Po optymalna praca elektrowni wymaga zszerszego zakresu wartości wielkości sterującej PWM zawartej w przedziale (0,4 ÷ 0,85). Należy tu jeszcze dodatkowo wziąć pod uwagę zmiany napięcia SEM ogniwa w zależności od stopnia jego naładowania.



Rys. 7 Charakterystyki mocy osiągniętej na wyjściu elektrowni wiatrowej dla obciążenia nieliniowego, w funkcji wartości sterującej - współczynnika wypełnienia fali PWM, dla różnych prędkości wiatru



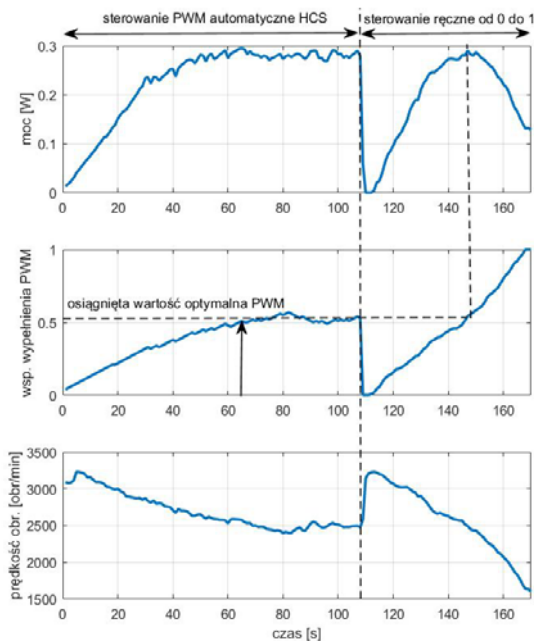
Rys. 8 Charakterystyka mocy maksymalnej elektrowni wiatrowej w funkcji wartości prędkości wiatru.

Na rysunku 8 przedstawiono otrzymaną charakterystykę osiągniętej mocy maksymalnej elektrowni w funkcji prędkości wiatru. W przeprowadzonym eksperymencie, turbina osiąga dużą wartość wyróżnika szybkobieżności $\lambda > 10$, – płaty turbiny są ustawione prawie prostopadłe do kierunku wiatru. Biorąc dodatkowo pod uwagę tarcie statyczne łożysk i szczotek oraz moment zaczepowy wynikający 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.

Wstępne 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 możliwie prostej przetwornicy, która w określony sposób mogłaby kształtować charakterystykę obciążenia mikroelektrowni.

Przeprowadzono badania dla pracy modelu mikroelektrowni wiatrowej, sterowanej prostym algorytmem HCS przedstawionym rysunku 2. Rysunek 9 przedstawia wybrane wyniki eksperymentu w postaci przebiegów czasowych: mocy elektrowni wiatrowej, wartości współczynnika wypełnienia PWM, i prędkości obrotowej turbiny. Wyniki otrzymano przy stałej prędkości wiatru $v = 5$ m/s



Rys. 9 Przebiegi czasowe: mocy elektrowni wiatrowej, wartości współczynnika wypełnienia PWM, i prędkości obrotowej turbiny, dla pracy modelu mikroelektrowni wiatrowej sterowanej prostym algorytmem HCS

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 zatrzymania turbiny i ponownego jej rozruchu. Pewną poprawę działania można w tym przypadku osiągnąć poprzez wykorzystanie w algorytmie sterowania zmierzonej wielkości prędkości obrotowej turbiny.

Podsumowanie

Otrzymane wyniki pomiarów na prezentowanym stanowisku badawczym potwierdzają jego przydatność do prowadzenia dalszych badań. Pomimo niewielkich rozmiarów zbudowanego modelu mikroelektrowni wiatrowej można na nim zaobserwować i zmierzyć zjawiska fizyczne związane z aerodynamiką turbiny wiatrowej i działaniem generatora prądu elektrycznego. Wyniki badań, w których

wykorzystywane są jedynie uproszczone modele matematyczne turbiny wiatrowej, często nie uwzględniają zjawiska tzw. „przeciągnięcia”. Jest ono 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 płytów z wykorzystaniem popularnych drukarek 3D. Ponadto stanowisko to umożliwi 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 działania, 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, 7, 8, 10]. Z uwagi na rosnący popyt na autonomiczne i przenośne mikroelektrownie hybrydowe, łączące niewielkie panele fotowoltaiczne i mikroturbiny wiatrowe, celowe jest prowadzenie badań nad poprawą efektywności energetycznej tych urządzeń. Dalsze prace będą koncentrować się na wykorzystaniu generatora synchronicznego z magnesami trwałymi PMSG [10], rozruchem mikroturbiny wiatrowej o dużym współczynniku szybkoobrotowości i algorytmami optymalnego sterowania MPPT mikroelektrownią.

Autor: dr hab. inż. Stanisław Chudzik, Politechnika Częstochowska, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: chudzik@el.pcz.czyst.pl

LITERATURA

- [1] Bukala J., Damaziak K., Krzeszowiec M., Malachowski J., Rozwiązania konstrukcyjne małych turbin wiatrowych, Modelowanie inżynierskie, (2014), n. 53, 21-29
- [2] Krzemiński Z., Szewczyk J., Bogalecka E., Sterowanie małą elektrownią wiatrową z wykorzystaniem efektu przeciągnięcia, Przegląd Elektrotechniczny, 94 (2018) n. 5 104-111
- [3] Błasiński W., Symulator turbiny wiatrowej małej mocy, Przegląd Elektrotechniczny, 93 (2017), n. 12, 263-265
- [4] Schubel P., Crossley R., Wind turbine blade design, Energies, (2012); n. 5(9), 3425-3449
- [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, 87 (2011) n. 6, 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
- [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
- [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
- [9] Baran J., Jäderko A., Sterowanie turbiną wiatrową z odtwarzaniem momentu aerodynamicznego, Przegląd Elektrotechniczny, 94 (2018), n. 5, 47-52
- [10] Gajewski P., Pieńkowski K., Control of a variable speed wind turbine system with PMSG generator, Maszyny Elektryczne-Zeszyty Problemowe, (2015), n. 107, 75-80