

## STEROWANIE MIKROELEKTROWNIĄ WIATROWĄ W WARUNKACH ZMIENNEGO WIATRU

Zbigniew KRZEMIŃSKI<sup>1,2</sup>, Elżbieta BOGALECKA<sup>3</sup>

1. MMB Drives sp. z o.o.  
tel.: 605068292, e-mail: zkrzem@mmb-drives.com.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 58 347 23 48, e-mail: zbikrzem@pg.edu.pl
3. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 58 347 29 36, e-mail: elzbogal@pg.edu.pl

**Streszczenie:** Duże elektrownie wiatrowe pracują przy małej zmienności prędkości i kierunku wiatru. Odmienna sytuacja występuje w przypadku mikroelektrowni, których turbina pracuje w strudze powietrza o szybko zmiennej prędkości i kierunku. W referacie określono warunki zainstalowania mikroelektrowni i pokazano algorytm sterowania elektrownią działający przy zmiennym wietrze. Wykorzystano pomiary na testowanej elektrowni. Pokazano, że algorytm sterowania zapewniający szybkie dostosowanie prędkości turbiny do wartości optymalnej zapewnia znaczne zwiększenie ilości wytworzonej energii elektrycznej. Szybkie ustawienie gondoli turbiny we właściwym kierunku zapewnia zwiększenie ilości wyprodukowanej energii. Efektem zastosowania zaproponowanych algorytmów jest produkcja energii elektrycznej w ilości równej lub większej od energii obliczanej na podstawie krzywej mocy.

**Słowa kluczowe:** mikroelektrownia wiatrowa, regulacja, optymalizacja.

### 1. WSTĘP

Metody sterowania dużymi elektrowniami wiatrowymi są szeroko znane i stosowane. Podstawowym założeniem przyjmowanym przy tworzeniu układu regulacji dużej elektrowni wiatrowej jest mała zmienność prędkości i kierunku wiatru. Założenie to jest słuszne ze względu na dużą wysokość zainstalowania i dużą omiataną powierzchnię turbiny. Odmienna sytuacja występuje w przypadku mikroelektrowni, których turbina pracuje w strudze powietrza o zmiennej prędkości i kierunku. W literaturze zaproponowano kilka możliwych strategii sterowania elektrownią wiatrową małej mocy o stałym kącie ustawienia łopat i obrotowej gondoli. W [1] zaproponowano regulację prędkości turbiny zadawanej na podstawie prędkości wiatru. Uwzględnianie zakłóceń w prędkości wiatru zaproponowano w [2]. Inną koncepcją jest zadawanie i regulacja prędkości kątowej turbiny w funkcji mocy lub momentu [3]. Tego typu algorytmy zapewniają zbieżność punktu pracy do optymalnego, nie uwzględniają jednak dynamiki zmian prędkości wiatru. Badania symulacyjne i eksperymentalne [4] wykazały, że nieuwzględnienie dynamiki wiatru w algorytmie znacznie obniża ilość wytworzonej energii.

Algorytmy sterowania elektrownią wiatrową badane są symulacyjnie z wykorzystaniem modeli wiatru.

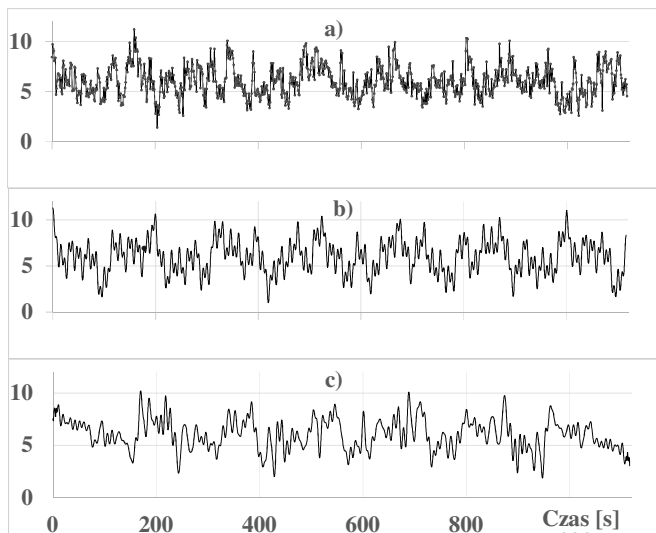
Proponowane są złożone modele z uwzględnieniem szerokiego spektrum harmonicznych i stochastycznymi przesunięciami kątowymi [1] oraz proste modele z wybranymi harmonicznymi [3].

Dynamika zmian prędkości wiatru uwzględniana jest w algorytmie zaproponowanym w [4]. W niniejszym referacie określono warunki występujące w miejscu zainstalowania mikroelektrowni i wyznaczono podstawowe częstotliwości zmian prędkości i kierunku wiatru. Opisano działanie algorytmu sterowania elektrownią przy zmiennym wietrze o małej średniej prędkości. Pokazano również, że zmiany prędkości wiatru wiążą się ze zmianami jego kierunku. Szybkie ustawienie gondoli turbiny we właściwym kierunku zapewnia zwiększenie ilości wyprodukowanej energii.

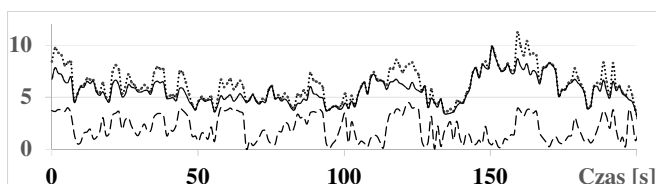
### 2. MODELOWANIE WIATRU

Badania efektywności działania algorytmów sterowania elektrownią wiatrową przeprowadzono z wykorzystaniem modelu prędkości wiatru opartego na danych pomiarowych. Na rysunku 1a) pokazano dane pomiarowe prędkości wiatru w czasie 1116 s. Przebieg z rysunku 1a) poddano transformacji Fouriera i wybrano dominujące częstotliwości uzyskując przebieg zawierający 5 harmonicznych pokazany na rysunku 1b) i przebieg zawierający 21 harmonicznych pokazany na rysunku 1c). Porównanie przebiegów z rysunku 1 prowadzi do stwierdzenia, że uwzględnienie małej liczby harmonicznych w modelu wiatru jest wystarczające do badania działania układów regulacji. Założenie jest tym bardziej uzasadnione, że energia niesiona przez wyższe harmoniczne wiatru jest odpowiednio mniejsza a bezwładność wirnika elektrowni ogranicza/tłumi ich oddziaływanie na ruch wirnika.

Istotny wpływ na produkcję energii elektrycznej ma kąt wiatru nacierającego na turbinę. Istnieje zależność/korelacja pomiędzy zmierzoną prędkością wiatru pokazaną na rysunku 2 linią kropkowaną a modulem kąta wiatru względem gondoli (linia kreskowana, wartości podzielone przez 10). Linią ciągłą pokazano składową prędkości wiatru prostopadłą do płaszczyzny turbiny pokazaną linią ciągłą. Kąt wiatru został zmierzony na elektrowni z działającym



Rys. 1. Prędkość wiatru w m/s a) zmierzona, b) z modelu o liczbie harmonicznych równej 5, c) z modelu o liczbie harmonicznych równej 21



Rys. 2. Prędkość wiatru [m/s] (linia kropkowana), składowa prostopadła do turbiny [m/s] (linia ciągła), moduł kąta wiatru dzielony przez 10 [stopnie] (linia przerywana)

układem regulacji kąta położenia gondoli. Z rysunku 2 wynika, że szybka zmiana prędkości wiatru wiąże się często ze zmianą kierunku wiatru. Zbyt wolne nadążanie za kierunkiem wiatru zmniejsza ilość uzyskiwanej energii, ponieważ moment obrotowy generuje składowa prędkości wiatru prostopadła do płaszczyzny turbiny.

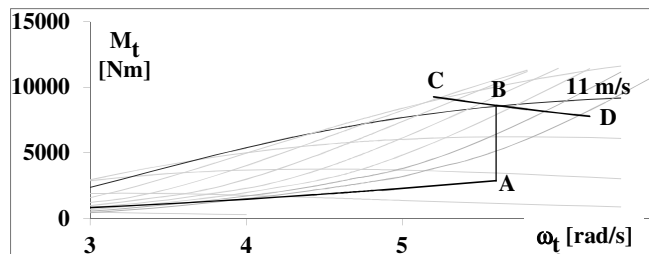
### 3. UKŁAD STEROWANIA ELEKTROWNIĄ WIATROWĄ

#### 3.1. Struktura układu sterowania elektrownią

Zaproponowany układ sterowania prędkością małej elektrowni wiatrowej działa odmiennie w każdym z trzech zakresów prędkości wiatru. Pierwszy zakres obejmuje prędkości wiatru od wartości startowej do wartości, przy której układ przechodzi do trybu regulacji prędkości. Punkt ten oznaczono jako A na rysunku 3 i jest to zakres optymalnej pracy elektrowni, czyli z maksymalną sprawnością aerodynamiczną. Drugi zakres obejmuje prędkości wiatru od punktu A do punktu B, wyznaczonego przez znamionową prędkość wiatru wynoszącą 11 m/s. W drugim zakresie regulowana jest prędkość kątowna turbiny. Powyżej znamionowej prędkości wiatru znajduje się trzeci zakres sterowania, wyznaczony przez punkty C i D, w którym moc turbiny jest regulowana na stałej wartości, równej mocy znamionowej. Warunkiem przejścia pomiędzy poszczególnymi stanami sterowania jest osiągnięcie odpowiedniej prędkości wiatru.

Regulowana moc turbiny wiatrowej obliczana jest z wykorzystaniem obserwatora, w którym odtwarzany jest moment i prędkość kątowna turbiny.

Sterowanie stanami pracy elektrowni, takimi jak start, wyłączenie i włączanie podzespołów, hamowanie, obsługa



Rys. 3. Zakresy regulacji turbiny wiatrowej na tle funkcji momentu względem prędkości kątowej przy różnych prędkościach wiatru

stanów awaryjnych, realizuje program sterownika. Zapewnia również trzy poziomy zabezpieczeń awaryjnych. Szczególnym stanem jest praca elektrowni przy zaniku napięcia sieci zasilającej z oddawaniem energii do rezystora.

#### 3.2. Sterowanie elektrownią wiatrową w zakresie małych prędkości wiatru

Powszechnie stosowanym algorytmem sterowania elektrownią wiatrową w zakresie małych prędkości wiatru (do punktu A na rysunku 4) jest regulacja momentu generatora w funkcji prędkości kątowej według zależności:

$$M_g = M_{gA} \omega_r^2, \quad (1)$$

gdzie  $M_g$  jest zadany momentem generatora,  $M_{gA}$  jest optymalnym momentem generatora w punkcie A,  $\omega_r$  jest względną prędkością kątowną turbiny.

Statyczna zależność (1) zapewnia maksymalną moc przy stałej prędkości wiatru. Elektrownia pracuje przy tym na stabilnej części charakterystyki momentu turbiny względem prędkości wiatru. Wzrost prędkości wiatru powoduje zwiększenie momentu wiatru i turbina przyspiesza. Prędkość turbiny zmienia się jednak powoli i nie nadąża wystarczająco szybko za optymalnym punktem pracy, co przy silnie zmiennym wietrze skutkuje małą sprawnością elektrowni. W referacie [4] zaproponowano modyfikację algorytmu sterowania, która wymusza szybkie nadążanie za zmiennym wiatrem. Jeżeli wiatr rośnie to elektrownia jest chwilowo odciążana, a przy malejącym wietrze dociążana zgodnie z zależnością:

$$M_g = k M_{gA} \omega_r^2, \quad (2)$$

gdzie

$$k = \begin{cases} \lambda_w^4 & \text{jeżeli } \lambda_w \leq 1 \\ 2 - (2 - \lambda_w)^4 & \text{jeżeli } \lambda_w > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda_w = \frac{\lambda}{\lambda_{opt}} \quad (4)$$

$\lambda$  jest wyróżnikiem szybkobieżności, a  $\lambda_{opt}$  jest wyróżnikiem szybkobieżności, dla którego współczynnik mocy turbiny  $C_p$  osiąga maksymalną wartość.

Czwarta potęga we wzorze (3) została przyjęta arbitralnie na podstawie badania efektywności algorytmu.

Zastosowanie zależności (2) prowadzi przy zmiennej prędkości wiatru do zwiększenia produkcji energii elektrycznej o kilka do kilkunastu procent zależnie od

charakteru zmian prędkości wiatru w porównaniu ze sterowaniem według zależności (1).

### 3.3. Regulacja prędkości kątovej turbiny przy średnich prędkościach wiatru

Dla średnich prędkości wiatru, przy których optymalna prędkość turbiny przekracza wartość znamionową, następuje włączenie układu regulacji prędkości turbiny. Najprostszym sposobem sterowania prędkością turbiny jest regulacja ze stałą wartością zadaną. Przy przełączeniu układu regulacji na regulację prędkości wartość zadana prędkości jest równa aktualnej prędkości turbiny, a następnie stopniowo zmieniana. Na wejście regulatora prędkości dodatkowo doprowadzany jest wzmocniony sygnał dodatniej odchyłki mocy turbiny, co zapobiega generowaniu dużej nadwyżki mocy. Zastosowano miękkie przełączanie między strefami regulacji, którego celem jest ograniczenia skoków mocy oddawanej do sieci.

Najprostszym sposobem sterowania prędkością turbiny regulacja ze stałą wartością zadaną. Dla mniejszych prędkości wiatru prędkość turbiny może być zwiększana, co zwiększa produkcję energii elektrycznej.

### 3.4. Regulacja mocy turbiny przy dużych prędkościach wiatru

Po przekroczeniu przez prędkość wiatru prędkości znamionowej, równej dla małych elektrowni 11 m/s, układ sterowania przechodzi w tryb regulacji mocy turbiny. Działanie układu regulacji mocy opiera się na odtwarzaniu momentu turbiny i obliczaniu mocy z wykorzystaniem aktualnej prędkości turbiny. Na charakterystykach pokazanych na rysunku 3 widać, że zwiększanie się prędkości wiatru powyżej prędkości znamionowej powoduje początkowo zmniejszanie prędkości turbiny w celu zachowania stałej mocy. Regulacja w tym zakresie jest bezpieczna, ponieważ zapas momentu generatora jest wystarczający do stabilizacji mocy turbiny. Przy większych prędkościach wiatru układ regulacji pracuje w zakresie od punktu C do punktu D. W tym zakresie zwiększanie prędkości wiatru powoduje zmniejszanie mocy turbiny i praca układu jest bezpieczna. Natomiast zmniejszanie się prędkości wiatru powoduje zwiększanie mocy turbiny, a więc układ sterowania turbiną musi zapewniać wytworzenie nadwyżki momentu zapewniającej stabilizację prędkości. Chwilowa moc generatora może przekroczyć moc znamionową elektrowni. Ograniczanie mocy oddawanej do sieci zapewnia rezystor zrzutowy.

### 3.5. Regulacja kąta położenia gondoli względem kierunku wiatru

Moc turbiny zależy od trzeciej potęgi składowej prędkości wiatru prostopadłej do płaszczyzny turbiny:

$$P_t = P_{t0} (\cos \rho)^3, \quad (5)$$

gdzie  $P_t$  jest mocą turbiny,  $P_{t0}$  jest mocą turbiny przy wietrze wiejącym prostopadle do płaszczyzny wirowania,  $\rho$  jest kątem pomiędzy kierunkiem wiatru a prostopadłą do płaszczyzny wirowania.

Duża zmienność kierunku wiatru na małej wysokości powoduje, że jest to czynnik istotnie wpływający na produkcję energii przez małą elektrownię wiatrową. Wyposażenie elektrowni w szybko działający anemometr umożliwia ustawianie gondoli względem wiatru bez

opóźnień i zwiększenie produkcji energii elektrycznej o 50% w porównaniu z ustawianiem na podstawie średniego kierunku wiatru obliczanego w długim przedziale czasu.

## 4. WYNIKI BADANIA MAŁEJ ELEKTROWNI WIATROWEJ

### 4.1. Symulacyjne badania efektywności algorytmu sterowania elektrownią przy małych prędkościach wiatru

Jeżeli nie podano jednostek fizycznych, wielkości na wykresach podano jako względne. Dla prędkości wiatru wielkością odniesienia jest znamionowa prędkość wiatru wynosząca dla badanej turbiny 11 m/s. Dla prędkości kątovej turbiny wielkością odniesienia jest znamionowa prędkość kątovej turbiny wynosząca 5,2 rad/sek lub 49,7 obr/min odpowiadająca synchronicznej prędkości generatora wynoszącej 1500 obr/min. Dla mocy turbiny i generatora wielkością odniesienia jest moc pozorna generatora wynosząca 56,1 kVA.

Energia elektryczna wyprodukowana przy małych prędkościach wiatru ma duże znaczenie ze względu na małą wysokość zainstalowania elektrowni. Badania porównawcze zaproponowanego algorytmu sterowania przy małych prędkościach wiatru mogą być przeprowadzone tylko symulacyjnie ze względu na możliwość zapewnienia powtarzalności przebiegów prędkości wiatru.

Wyniki badań elektrowni wiatrowej przy małych prędkościach wiatru pokazano w tabelicy 1. Zastosowano sterowanie zgodnie z zależnościami (1) i (2) oraz z zastosowaniem modeli zawierających dwie harmoniczne prędkości wiatru. W pierwszym wariantcie modelu wiatru harmoniczna o mniejszej częstotliwości ma większą amplitudę, a w drugim wariantcie mniejszą. Do obliczania energii wytworzonej przez elektrownię wykorzystano dane zarejestrowane w przedziale 200 s dla średniej prędkości wiatru wynoszącej 4,5 m/s.

Tabela 1. Energia wytworzona w dwóch wariantach

Wariant zmian prędkości	Algorytm według wzoru	Średnia prędkość względna turbiny	Energia wytworzona w czasie 200 s [kJ]
1	1	0,62	698
1	2	0,67	721
2	1	0,62	691
2	2	0,675	717

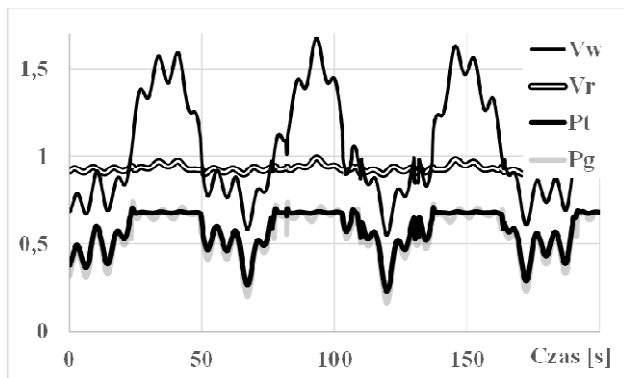
Z tabelicy 1 widać, że zastosowanie wzoru (2) powoduje kilkuprocentowe zwiększenie produkcji energii elektrycznej w porównaniu z zastosowaniem wzoru (1). Na podstawie szerszych badań stwierdzono, że efektywność algorytmu może być zoptymalizowana przez uzależnienie wielkości  $\lambda_{opt}$  od zmienności prędkości wiatru.

### 4.2. Symulacyjne badania przełączeń zakresów pracy elektrowni

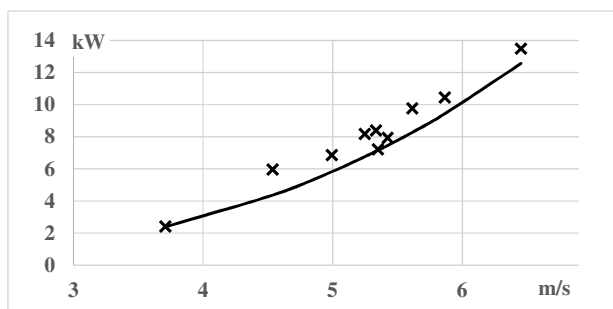
Wyniki symulacyjnego badania algorytmów regulacji w zakresie średnich i dużych prędkości wiatru pokazano na rysunku 4. Przełączenia pomiędzy regulacją prędkości i regulacją mocy odbywają się bez widocznych zaburzeń.

### 4.3. Wyniki badania elektrowni o mocy 40 kW

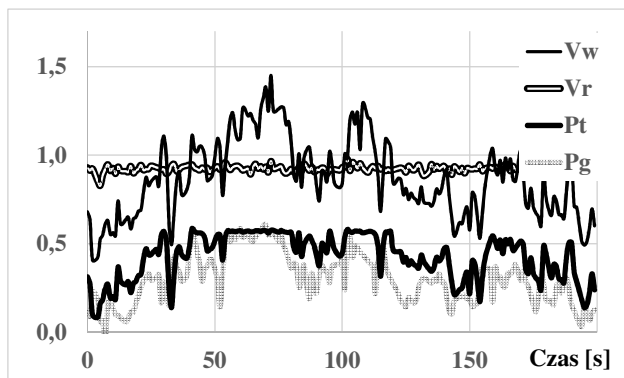
Przedstawione algorytmy zastosowano w układzie regulacji elektrowni wiatrowej o znamionowej mocy równej 40 kW. Ograniczenie prędkości turbiny wynosiło 0,92 j.w.,



Rys. 4. Symulacyjne przebiegi prędkości wiatru  $V_w$ , prędkości obrotowej turbiny  $V_r$ , mocy turbiny  $P_t$  i mocy generatora  $P_g$ , wielkości podano w jednostkach względnych



Rys. 5. Średnia moc zmierzona w trzyminutowych odcinkach czasu (znaczniki) dla małych prędkości wiatru i moc obliczona z krzywej mocy (linia ciągła)



Rys. 6. Eksperymentalne przebiegi prędkości wiatru  $V_w$ , prędkości obrotowej turbiny  $V_r$ , mocy turbiny  $P_t$  i mocy generatora  $P_g$ , wielkości podano w jednostkach względnych

a ograniczenie mocy 0,68 j.w. Wyznaczano średnią prędkość wiatru i średnią moc elektrowni. Wyniki pokazano na rysunku 5.

## MICRO WINDMILL CONTROL IN VARIABLE WIND CONDITIONS

Large wind turbines are working at low variability of wind speed and direction. A different situation exists in the case of micro windmills, which turbine works in the stream of air of variable speed and direction. The paper specifies the conditions for installing a micro windmill and shows the control algorithm of a power plant operating in a variable wind. The measurements on the tested power plant were used. It was shown that the control algorithm ensuring fast adaptation of the turbine speed to the optimal value ensures a significant increase in the amount of electricity generated. The rapid placement of the turbine nacelle in the right direction increases the amount of energy produced. The effect of using the proposed algorithms is to produce electricity in an amount equal to or greater than energy calculated on the basis of the power curve.

**Keywords:** micro windmill, control, optimization.

Wyniki badania elektrowni przy średnim i dużym wietrze pokazano na rysunku 6. Ograniczono moc i prędkość turbiny w celu pokazania działania układu regulacji przy występujących warunkach pogodowych.

## 5. WNIOSKI

Zaproponowano algorytmy sterowania elektrownią wiatrową działające dla trzech zakresów prędkości wiatru. Pokazano, że algorytm sterowania zapewniający szybkie dostosowanie prędkości turbiny do wartości optymalnej zapewnia zwiększenie ilości wytworzonej energii elektrycznej. Wskazano, że szybkie ustawienie gondoli turbiny we właściwym kierunku względem wiatru zapewnia dalsze zwiększenie ilości wyprodukowanej energii. Efektem zastosowania zaproponowanych algorytmów jest produkcja energii elektrycznej w ilości równej, a w niektórych przypadkach większej, od energii obliczanej na podstawie statycznej krzywej mocy. Badanie działania algorytmów sterowania i analizę ilości wytwarzanej energii oparto na danych zgromadzonych podczas pracy elektrowni wiatrowej o mocy 40 kW testowanej przez czas przekraczający jeden rok.

## 6. INFORMACJA

Projekt finansowany ze środków RPOWP w ramach projektu RPPM.01.01.01-22-0076/16-00



URZĄD MARSZAŁKOWSKI  
WOJEWÓDZTWA POMORSKIEGO

Unia Europejska  
Europejskie Fundusze  
Strukturalne i Inwestycyjne



## 7. BIBLIOGRAFIA

- McIver A., Holmes D.G., Freere P.: Optimal control of a variable speed wind turbine under dynamic wind conditions, IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting, vol. 3, 1996, s. 1692 – 1698.
- Zhao C., Wu Q., Rasmussen C. N., Blanke M.: L1 Adaptive Speed Control of a Small Wind Energy Conversion System for Maximum Power Point Tracking, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 29, Issue 3, 2014, s. 576 – 584.
- Mirecki A., Roboam X., Richardeau F.: Architecture Complexity and Energy Efficiency of Small Wind Turbines, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, 2007, s. 660 – 670.
- Krzemiński Z., Szweczyk J., Bogalecka E.: Sterowanie małą elektrownią wiatrową z wykorzystaniem efektu przeciągnięcia, XIII Krajowa Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE 2017, Łódź, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, 2017, s.1-6.

