

Wojciech MATELSKI
Eugeniusz ŁOWIEC
Stanisław ABRAMIK

SYMULATOR MAŁEJ TURBINY WIATROWEJ

STRESZCZENIE *W artykule przedstawiono koncepcję symulatora turbiny wiatrowej, zbudowanego na bazie silnika indukcyjnego klatkowego zasilanego z przetwornicy częstotliwości. Opracowany model zakłada sterowanie momentem napędowym silnika z uwzględnieniem momentu bezwładności odtwarzanej turbiny. Działanie algorytmu sterowania sprawdzono za pomocą programu PSIM. Przedstawiono zachowanie się układu symulatora dla różnych warunków wietrznych. Silnik indukcyjny wiernie odtwarza moc oraz prędkość obrotową symulowanej turbiny. W pracy przedstawiono realizację stanowiska laboratoryjnego.*

Słowa kluczowe: silniki indukcyjne, energia wiatru, symulacja
DOI: 10.5604/00326216.1210742

1. WSTĘP

Rosnąca troska o środowisko naturalne powoduje stopniowe zwiększenie wykorzystania energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Najbardziej obiecującym z tych źródeł wydaje się być energetyka wiatrowa [1]. Szybki wzrost udziału energii elektrycznej wytwarzanej z wiatru w całkowitej produkcji energii w systemie, stawia przed energetyką wiatrową kolejne wyzwania. Docelowo elektrownie wiatrowe mają zachowywać się jak konwencjonalne źródła energii. W sytuacjach spadku napięcia lub częstotliwości w sieci, elektrownie wiatrowe mają wspierać pracę systemu poprzez regulację wytwarzanej mocy czynnej i biernej. W chwili obecnej w wielu krajach istnieją ścisłe przepisy określające jakość energii generowanej przez turbiny wiatrowe, którą można wprowadzić do sieci [1]. Aby sprostać tym wymaganiom konieczne jest stosowanie przekształtników energoelektronicznych. Urządzenia te sprzęgają generator elektrowni wiatrowej z systemem elektroenergetycznym.

**mgr inż. Wojciech MATELSKI, dr inż. Eugeniusz ŁOWIEC
dr inż. Stanisław ABRAMIK**

e-mail: [wojciech.matelski; eugeniusz.lowiec; stanislaw.abramik]@iel.gda.pl

Instytut Elektrotechniki Oddział w Gdańsku,
ul. Narwicka 1, 80-557 Gdańsk

Ponieważ przeprowadzenie prób nowych rozwiązań sprzętowych przekształtników oraz algorytmów sterowania dla energetyki wiatrowej jest zwykle kłopotliwe i bardzo trudne do zrealizowania na obiekcie rzeczywistym, niezbędne są symulatory. Mimo upływu lat, w kolejnych jednostkach naukowych, w szczególności w wyższych uczelniach technicznych, nadal prowadzone są prace nad skonstruowaniem własnych stanowisk, umożliwiających badania przekształtników w laboratorium niezależnie od warunków wietrznych.

Celem niniejszej pracy jest opracowanie układu symulatora małej turbiny wiatrowej, o mocy nie przekraczającej 3 kW, w którym obracane siłą wiatru łopaty turbiny zastąpiono silnikiem indukcyjnym zasilanym z przetwornicy częstotliwości. Wielkością sterowaną jest moment napędowy silnika. Stanowiska o podobnej koncepcji opisano w pracach [2, 3, 5, 6].

Pracę symulatora odtwarzającego statyczną charakterystykę turbiny wiatrowej poprzez sterowanie prędkością obrotową silnika indukcyjnego zgodnie z prostym algorytmem sterowania $u/f = \text{const.}$ z regulacją poślizgu przedstawiono w pracy [7]. W niniejszym artykule zaprezentowano symulator pracujący ze wspomnianym wyżej algorytmem, jednak w tym rozwiązaniu wielkością podlegającą regulacji jest moment obrotowy silnika. Dodatkowo w procesie symulacji uwzględniono również moment bezwładności odtwarzanej turbiny wiatrowej, co zapewnia odwzorowanie pewnych aspektów pracy turbiny w warunkach dynamicznych.

Opracowane stanowisko laboratoryjne posłuży do badań i testów przekształtników energoelektronicznych pośredniczących w przekazywaniu energii z elektrowni wiatrowej do sieci elektroenergetycznej oraz algorytmów sterowania takich przekształtników.

W pracy przedstawiono wyniki symulacji proponowanego algorytmu sterowania modelem oraz zaprezentowano realizację stanowiska laboratoryjnego. Do badań weryfikacyjnych użyto oprogramowania symulacyjnego PSIM. Sprawdzono stabilność układu oraz jego zachowanie przy odwzorowaniu różnych warunków wietrznych.

2. MODEL MATEMATYCZNY SILNIKA WIATROWEGO

Energię kinetyczną poruszającego się strumienia powietrza, można obliczyć z zależności:

$$E = \frac{mV^2}{2} \quad (1)$$

gdzie:

m – masa strugi powietrza [kg],
 V – prędkość wiatru [m/s].

Wiatr wprawia w ruch łopaty turbiny wiatrowej, której końce zakreślają okrąg o powierzchni:

$$A = \pi R^2 \quad (2)$$

gdzie:

R – długość łopat turbiny wiatrowej [m].

Masę strugi powietrza można wyrazić zależnością:

$$m = \rho v \quad (3)$$

gdzie:

ρ – gęstość powietrza [kg/m^3],
 v – objętość strugi powietrza [m^3].

Uwzględniając równania (1) – (3), teoretyczna moc wiatru powodującego obrót turbiny wiatrowej wyniesie:

$$P_w = \frac{E}{t} = \frac{\rho \pi R^2 V^3}{2} \quad (4)$$

gdzie:

t – jednostka czasu [s].

2.1. Charakterystyka turbiny wiatrowej

Parametrem charakteryzującym pracę turbiny wiatrowej jest współczynnik mocy C_p , nazywany również współczynnikiem efektywności, określany jako stosunek:

$$C_p = \frac{P_t}{P_w} \quad (5)$$

gdzie:

P_t – moc mechaniczna na wale turbiny [W].

Zgodnie z prawem Betz'a wartość tego współczynnika wynosi maksymalnie 0,59. Wartość C_p podaje się najczęściej w funkcji λ , zwanego wyróżnikiem szybkobieżności:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V} \quad (6)$$

gdzie:

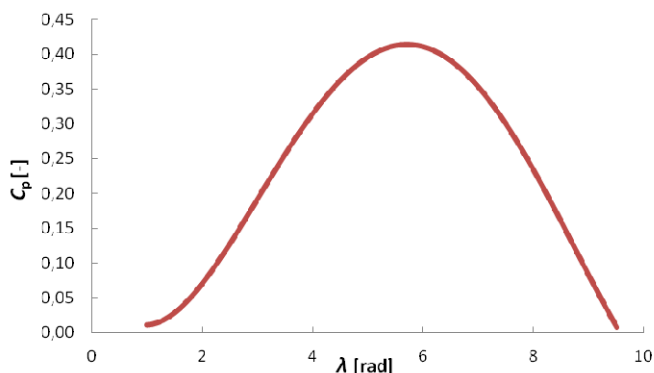
ω_r – prędkość obrotowa wału turbiny [rad/s].

Na rysunku 1 przedstawiono przykładową charakterystykę turbiny wiatrowej trzy łopatewej, którą opisuje wielomian czwartego stopnia [4]:

$$C_p(\lambda) = A_0 + A_1\lambda + A_2\lambda^2 + A_3\lambda^3 + A_4\lambda^4 \quad (7)$$

gdzie:

$A_0 = 0,093368$, $A_1 = -0,1838$, $A_2 = 0,118605$, $A_3 = -0,01773$, $A_4 = 0,000756$.



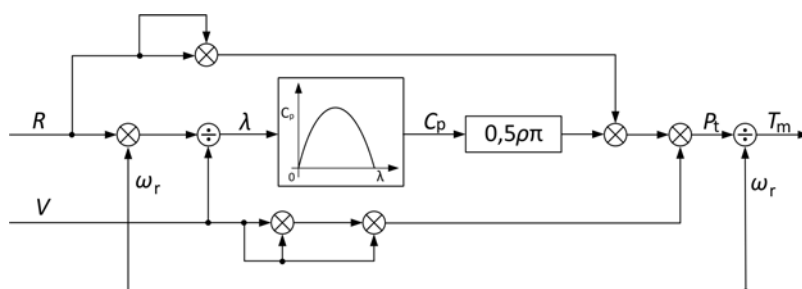
Rys. 1. Charakterystyka współczynnika efektywności przykładowej trzy łopatej turbiny wiatrowej

Charakterystyki $C_p(\lambda)$ uzyskiwane są drogą pomiarową i mogą być podawane przez producenta turbiny.

Na wartość mocy P_t generowanej przez turbinę ma wpływ kąt nachylenia łopat β w stosunku do kierunku natarcia wiatru. Zmiana tego kąta wpływa na kształt charakterystyki $C_p(\lambda)$. W większości elektrowni wiatrowych małej mocy nie ma możliwości regulacji kąta β , dlatego w niniejszej pracy przyjęto dla uproszczenia niezmienną wartość kąta β .

Do odtworzenia zachowania turbiny wiatrowej potrzebny jest model matematyczny urządzenia zaimplementowany w pamięci sterownika układu symulatora. W niniejszej pracy zaadaptowano model bazujący na charakterystyce współczynnika efektywności [8]. Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy wykorzystanego modelu matematycznego.

Na podstawie aktualnej prędkości obrotowej wirnika ω_r , prędkości wiatru V oraz podanej wartości promienia turbiny R w pierwszej kolejności, zgodnie z równaniem (6), zostaje wyznaczony współczynnik λ . Następnie w oparciu o charakterystykę $C_p = f(\lambda)$ określony zostaje współczynnik mocy turbiny (7). Podstawiając (4) do (5) wyznaczona



Rys. 2. Schemat blokowy modelu matematycznego odtwarzania charakterystyki turbiny wiatrowej

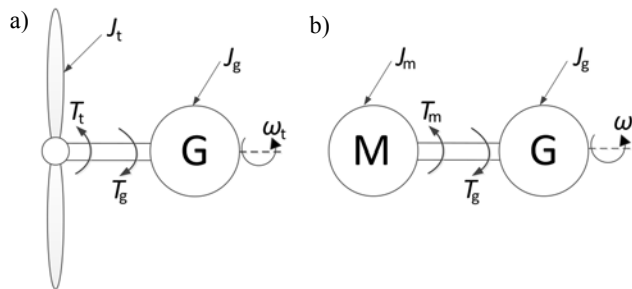
zostaje moc turbiny P_t . Znając aktualną wartość prędkości obrotowej wału, (sprzęg bezpośredni – brak przekładni) można określić moc turbiny również na podstawie:

$$P_t = \omega_r T_m \quad (8)$$

Z zależności (8) w łatwy sposób po przekształceniu otrzymuje się moment zadany T_m silnika indukcyjnego, który zostaje przesłany do dalszej części układu sterowania symulatorem.

2.2. Odtworzenie momentu bezwładności

Model przedstawiony na rysunku 2 zapewnia poprawną symulację turbiny jedynie w stanach ustalonych, co obejmuje okresy w których wiatr ma stabilną prędkość. Aby umożliwić odwzorowanie również stanów dynamicznych, należy uwzględnić moment bezwładności J_t symulowanej turbiny. Jest to istotne, gdyż moment bezwładności silnika indukcyjnego jest wielokrotnie mniejszy od momentu bezwładności turbiny wiatrowej. Na rysunku 3 przedstawiono poglądowo rozkład momentu bezwładności elektrowni wiatrowej oraz symulatora silnika wiatrowego.



Rys. 3. Rozkład momentu bezwładności oraz zwroty momentów obrotowych w układzie: a) elektrowni wiatrowej; b) symulatora turbiny wiatrowej

Układ pokazany na rysunku 3a można opisać równaniem [5]:

$$T_t = (J_t + J_g) \frac{d\omega_t}{dt} + T_g \quad (9)$$

gdzie:

- J_t – moment bezwładności turbiny wiatrowej [kgm^2],
- J_g – moment bezwładności generatora [kgm^2],
- T_g – moment obciążenia [$\text{N}\cdot\text{m}$],
- T_t – moment napędowy generowany przez turbinę [$\text{N}\cdot\text{m}$],
- ω_t – prędkość obrotowa wału turbiny [rad/s].

Po zastąpieniu silnika wiatrowego silnikiem indukcyjnym – rysunek 3b, równanie ruchu napędu przyjmuje postać [5]:

$$T_m = (J_m + J_g) \frac{d\omega_r}{dt} + T_g \quad (10)$$

gdzie:

- J_m – moment bezwładności silnika indukcyjnego [kgm²],
- T_m – moment napędowy silnika indukcyjnego [N·m],
- ω_r – prędkość obrotowa wału silnika indukcyjnego [rad/s].

Wyznaczając z równania (10) T_g i podstawiając do (9) oraz uwzględniając, że $\omega_t = \omega_r$, po odpowiednich przekształceniach można uzyskać nową zależność opisującą moment napędowy silnika T_m :

$$T_m = T_t - (J_m - J_t) \frac{d\omega_r}{dt} = T_t - T_{\text{popr}} \quad (11)$$

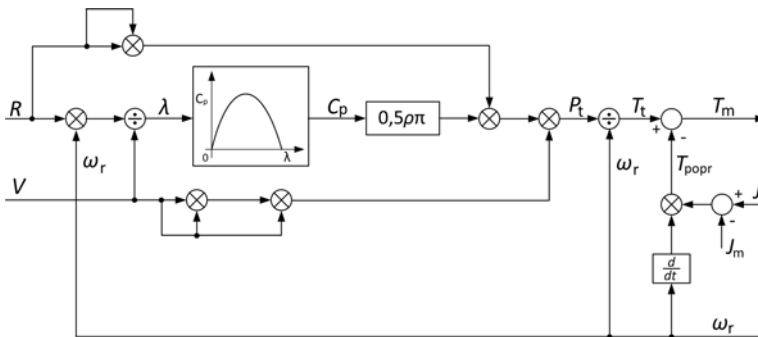
gdzie:

- T_{popr} – moment poprawkowy [N·m].

Otrzymany dodatkowy składnik momentu napędowego to wartość kompensująca różnicę momentów bezwładności odtwarzanej turbiny i silnika.

Wprowadzone zmiany powodują rozwinięcie modelu matematycznego turbiny wiatrowej z rysunku 2 do postaci przedstawionej na rysunku 4.

Uwzględnienie momentu bezwładności turbiny w jej modelu matematycznym wpływa na zachowanie symulatora w sytuacjach, gdy prędkość wiatru ulega zmianie. Układ wolniej przyspiesza oraz dłużej hamuje niż w przypadku modelu bez omawianej funkcjonalności, przy czym czasy te są proporcjonalne do wprowadzonej wartości momentu bezwładności odtwarzanej turbiny.



Rys. 4. Schemat blokowy modelu matematycznego odtwarzania charakterystyki turbiny wiatrowej z uwzględnieniem momentu bezwładności turbiny

2.3. Symulacja wiatru

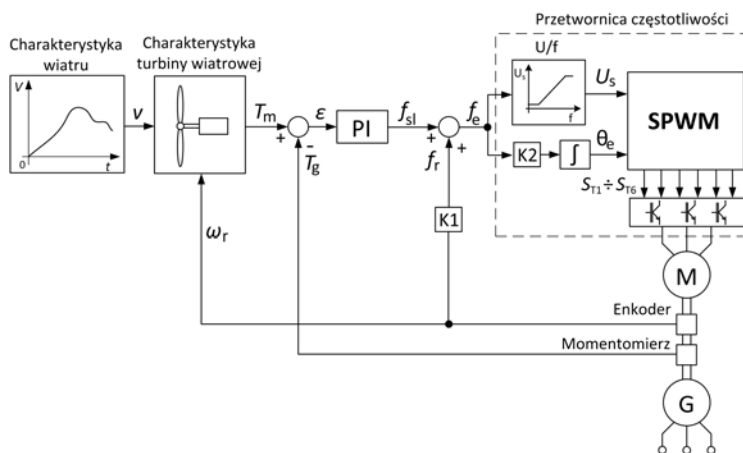
Dzięki obrotowej gondoli i statecznikowi pionowemu małe elektrownie wiatrowe dostosowują położenie osi wirnika równoległe do wiejącego wiatru. Zatem kierunek obrotów łopat turbiny jest stały. Z tego względu kierunek obrotów wału symulatora jest również niezmienny. W pracach dotyczących symulacji turbin wiatrowych najczęściej opisywane są trzy metody zadawania prędkości wiatru.

Najbardziej odpowiadającym rzeczywistości sposobem wydaje się odtworzenie zarejestrowanego wcześniej w terenie przebiegu zmian prędkości wiatru. Bardzo dobre rezultaty uzyskuje się również poprzez symulację programową w oparciu o spektrum Van der Hovena [5]. Możliwe jest również ręczne kształtowanie przebiegu szybkości wiatru.

3. OPIS SYMULATORA TURBINY WIATROWEJ

Symulator turbiny wiatrowej zrealizowano w zamkniętym układzie automatycznej regulacji. Sterowanie prędkością obrotową silnika indukcyjnego odbywa się za pomocą falownika napięcia MSI. Schemat blokowy modelu turbiny wiatrowej przedstawiono na rysunku 5.

Układ pracuje w oparciu o algorytm skalarne sterowania momentem obrotowym T_m z regulacją poślizgu f_{sl} silnika. Jest to rozwinięcie metody sterowania z warunkiem $u/f = \text{const}$. Punktem wejściowym jest blok reprezentujący zadany przebieg prędkości wiatru V . Aktualna w danej chwili wartość prędkości V oraz zmierzona prędkość obrotowa wału silnika ω_r , pochodzącej z enkodera, trafia do bloku zawierającego model matematyczny oraz parametry odtwarzanej turbiny (rys. 4). W tym miejscu zostaje wyznaczony moment zadany T_m silnika indukcyjnego. Na podstawie różnicy wartości T_m oraz zmierzonego sygnału momentu obciążenia T_g , pochodzącego z momentomierza, uzyskuje się wartość uchybu ε , który jest podawany na wejście



Rys. 5. Schemat blokowy symulatora turbiny wiatrowej

regulatora typu PI. W ten sposób uzyskuje się zadaną wartość częstotliwości poślizgu f_{sl} . Na podstawie mierzonej prędkości wirnika, obliczona zostaje częstotliwość f_r . Suma częstotliwości f_r oraz zadanej wartości poślizgu f_{sl} daje nową wartość częstotliwości napięcia stojana f_e silnika indukcyjnego. Jest to sygnał sterujący przesyłany do przetwornicy częstotliwości. Zgodnie z charakterystyką u/f zostaje wyznaczony moduł napięcia wyjściowego U_s falownika oraz położenie θ_e wektora U_u , z którego łatwo otrzymać fazy pozostałych wektorów napięć wyjściowych i tym samym określić ich wartości chwilowe (12):

$$u_u = U_s \sin(\theta_e) \quad (12a)$$

$$u_v = U_s \sin(\theta_e - 120^\circ) \quad (12b)$$

$$u_w = U_s \sin(\theta_e + 120^\circ) \quad (12c)$$

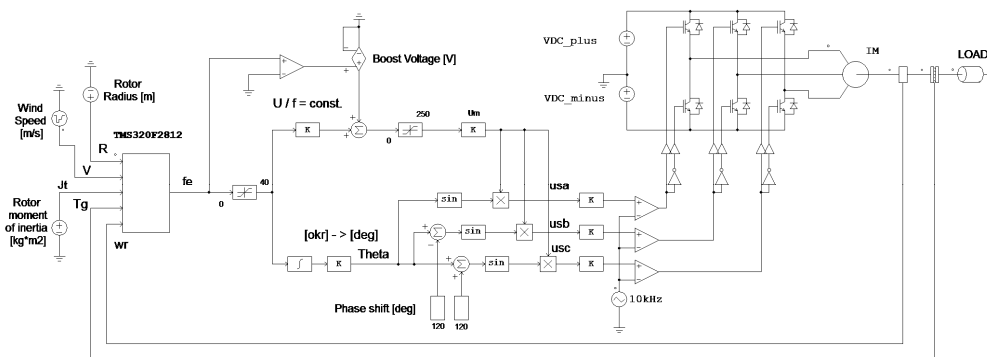
W modulatorze szerokości impulsów wyznaczone zostają sygnały sterujące tranzystorów $S_{T1} \div S_{T6}$, odtwarzające zadane wartości chwilowe napięć wyjściowych falownika.

4. MODEL SYMULACYJNY W PROGRAMIE PSIM

Zaproponowana koncepcja symulatora turbiny wiatrowej została zweryfikowana za pomocą programu symulacyjnego PSIM. Schemat topologiczny użyty w symulacjach przedstawiono na rysunku 6. Układ ten jest realizacją schematu blokowego z rysunku 5.

4.1. Profil wiatru i turbiny

W procesie symulacji profil wiatru jest zadawany ze źródła napięcia o przebiegu zdefiniowanym przez użytkownika. Przykładowy wykres zmian prędkości wiatru przedstawiono na rysunku 7.

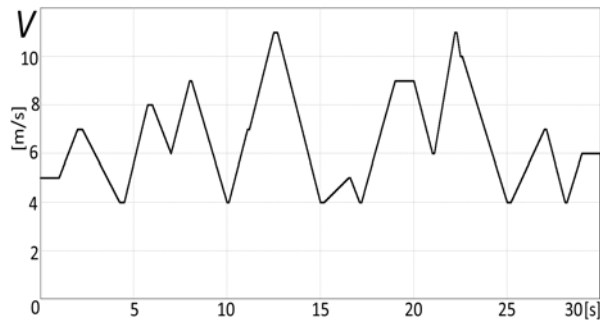


Rys. 6. Model symulatora turbiny wiatrowej opracowany w programie PSIM

Algorytm odtworzenia charakterystyki turbiny wiatrowej jest zrealizowany w bloku użytkownika: *TMS320F2812*, za pomocą instrukcji w języku C. Blok ten odzwierciedla działanie nadrzędnego sterownika układu. Moment bezwładności J_m silnika nie podlega zmianom, dlatego jest zawarty jako stała w bloku sterownika.

4.2. Przetwornica częstotliwości

Silnik indukcyjny w modelu symulacyjnym PSIM jest zasilany poprzez mostkowy sześciotranzystorowy falownik napięcia, realizujący algorytm sterowania $u/f = \text{const}$. Dla uproszczenia układ pobiera energię ze źródeł prądu stałego, stanowiących odpowiednik obwodu pośredniczącego prądu stałego w rzeczywistych przetwornicach częstotliwości. Suma napięć tych źródeł wynosi 540 V. Sygnały sterujące tranzystorów falownika wyznaczone są z wykorzystaniem sinusoidalnej modulacji szerokości impulsów z sygnałem nośnym o częstotliwości 10 kHz.



Rys. 7. Przykładowy przebieg zmian prędkości wiatru

4.3. Silnik indukcyjny i obciążenie

Do badań symulacyjnych przyjęto liniowy model statyczny silnika indukcyjnego klatkowego, którego parametry zestawiono w tabeli 1. Wszystkie parametry sprowadzono do strony stojana.

TABELA 1

Opis modelu silnika indukcyjnego

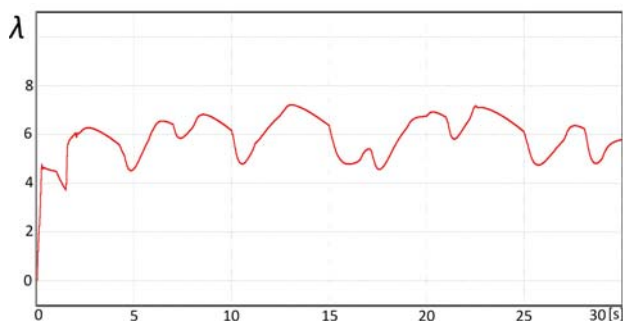
Parametr	Oznaczenie	Wartość
Rezystancja uzwojeń stojana	R_s	1,6333 Ω
Indukcyjność rozproszenia stojana, wirnika	L_{ls}, L_{lr}'	10,5 mH
Indukcyjność magnetyzacji	L_m	114,7 mH
Rezystancja uzwojeń wirnika	R_r'	1,8196 Ω
Moment bezwładności	J_m	0,031 kgm^2
Liczba biegunów	p	8

W celu pozyskania maksymalnej mocy, przy danej prędkości wiatru, w rzeczywistych układach elektrowni wiatrowych prąd pochodzący z generatora, a tym samym moment obciążenia, jest regulowany tak, by osiągnąć wyróżnik λ odpowiadający maksymalnej wartości współczynnika efektywności C_p .

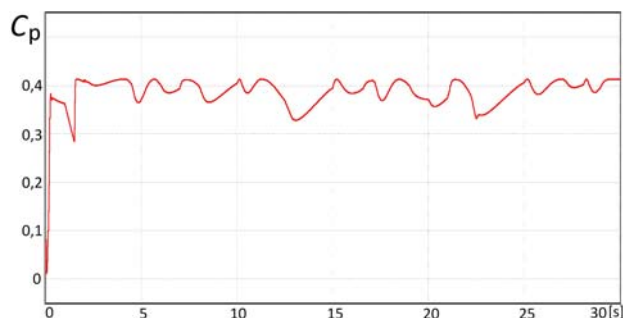
Sterowanie pracą generatora nie jest przedmiotem niniejszego opracowania, dlatego w symulacji obciążenie silnika stanowi blok *LOAD*. Charakteryzuje się on wzrostem momentu oporowego proporcjonalnie do prędkości obrotowej wału silnika, co odpowiada działaniu obciążanego generatora rezystancją o stałej wartości.

5. WYNIKI SYMULACJI

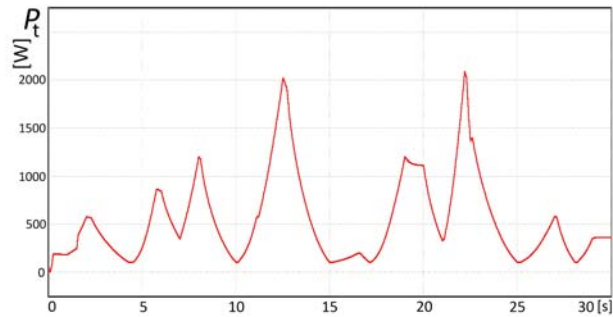
Działanie modelu symulacyjnego sprawdzono dla przebiegu zmian prędkości wiatru przedstawionego na rysunku 7. Zasymlowano turbinę wiatrową o promieniu R równym 1,5 m, momencie bezwładności J_t o wartości $0,3 \text{ kgm}^2$ oraz charakterystyce $C_p = f(\lambda)$ opisaną równaniem (7). Wyniki symulacji w postaci przebiegów charakterystycznych wartości przedstawiono na rysunkach 8 – 16.



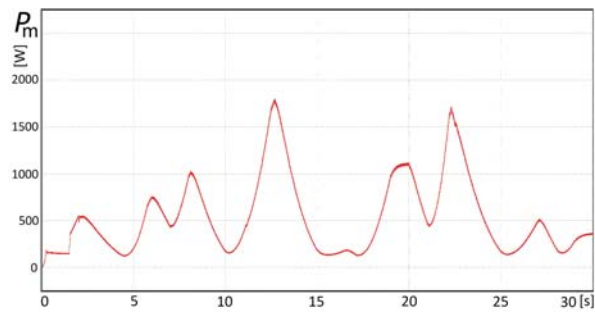
Rys. 8. Przebieg wyróżnika szybkobieżności



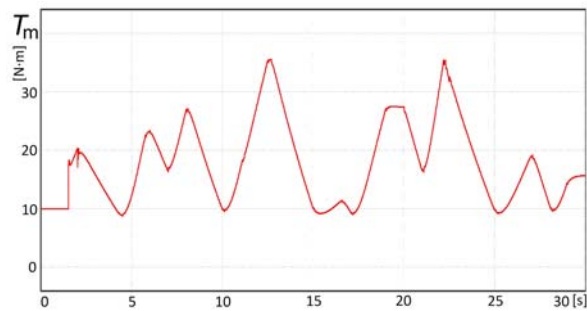
Rys. 9. Przebieg współczynnika efektywności odtwarzanej turbiny wiatrowej



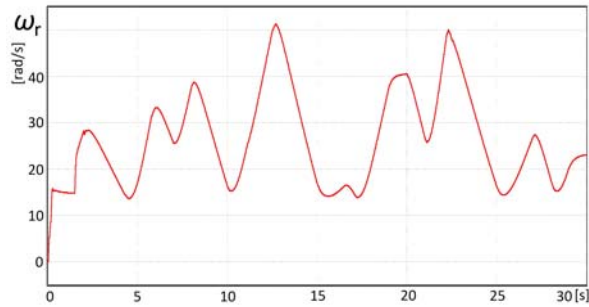
Rys. 10. Przebieg mocy generowanej przez odtwarzaną turbinę wiatrową



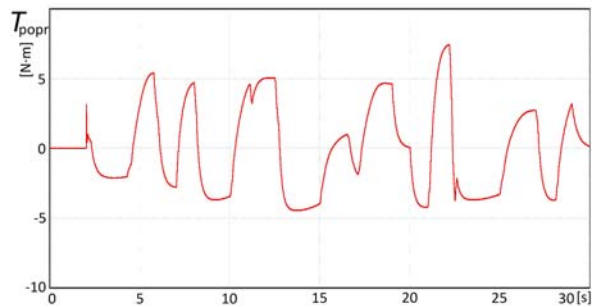
Rys. 11. Przebieg mocy mechanicznej mierzonej na wale silnika indukcyjnego



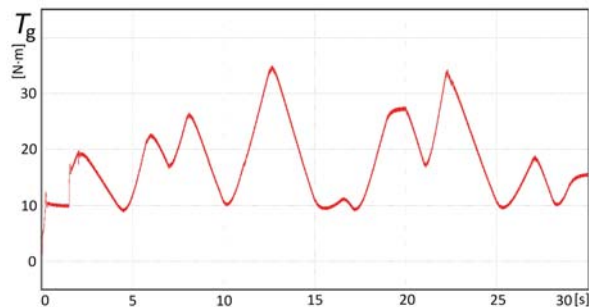
Rys. 12. Przebieg momentu zadanego silnika indukcyjnego



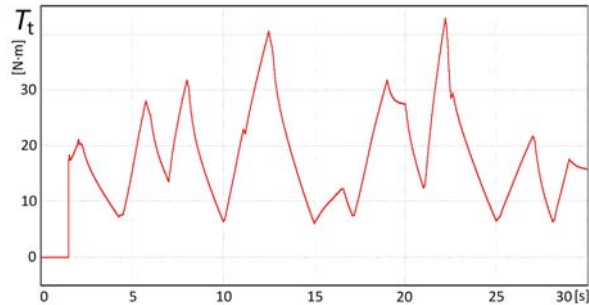
Rys. 13. Przebieg prędkości mierzonej na wale silnika indukcyjnego



Rys. 14. Przebieg momentu poprawkowego odwierciedlającego bezwładność łopat odtwarzanej turbiny wiatrowej



Rys. 15. Przebieg momentu mechanicznego mierzonego na wale silnika indukcyjnego

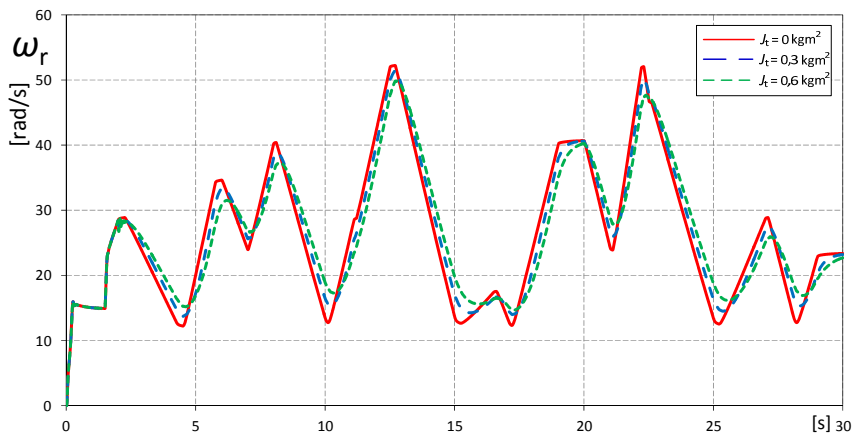


Rys. 16. Przebieg momentu odtwarzanej turbiny wiatrowej

Na rysunku 17 przedstawiono wpływ momentu bezwładności J_t symulowanej turbiny wiatrowej na rozwijaną prędkość obrotową układu dla trzech wartości J_t . Zadany przebieg wiatru oraz inne parametry modelu symulacyjnego nie były zmieniane. W badaniach uwzględniono moment bezwładności J_m silnika indukcyjnego o wartości $0,031 \text{ kgm}^2$.

6. STANOWISKO BADAWCZE

W Oddziale Gdańskim Instytutu Elektrotechniki zbudowano model laboratoryjny symulatora małej turbiny wiatrowej, o mocy nie przekraczającej 3 kW. Widok części mechanicznej zbudowanego układu przedstawiono na rysunku 18, a parametry poszczególnych podzespołów zestawiono w tabeli 2.



Rys. 17. Przebiegi prędkości obrotowej silnika dla różnych wartości momentu bezwładności symulowanej turbiny wiatrowej

Realizacja algorytmu symulatora elektrowni wymaga zastosowania układu sterowania charakteryzującego się przede wszystkim dużą szybkością wykonywania obliczeń, co zapewnia stabilność pracy układu regulacji. Schemat blokowy zaproponowanego układu sterowania przedstawiono na rysunku 19.



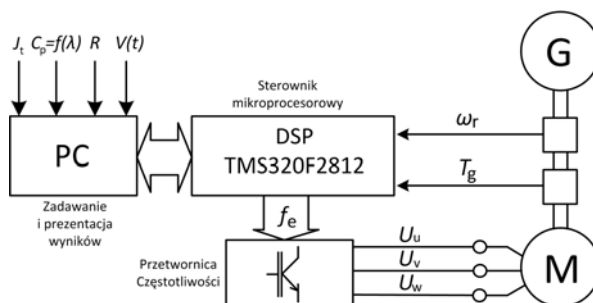
Rys. 18. Zbudowany układ mechaniczny symulatora turbiny wiatrowej

TABELA 2

Opis zbudowanego stanowiska laboratoryjnego

Podzespół	Opis
Silnik indukcyjny klatkowy	3 kW, 720 obr/min, 3x400 V, obce chłodzenie
Generator PMSG	3 kVA, 450 obr/min, 3x400 V
Enkoder inkrementalny	1024 imp/obr
Miernik momentu obrotowego	+/- 75 N·m
Sprzęgła mechaniczne	sprzęgła bezluzowe
Przetwornica częstotliwości	SV055iG5A-4 firmy LS: 5,5 kW, 3x400 V

Parametry odtwarzanej turbiny wiatrowej są wprowadzane poprzez aplikację uruchamianą na komputerze klasy PC, skąd zostają przesyłane do sterownika mikroprocesorowego, gdzie trafiają również sygnały pomiarowe momentu obrotowego T_g oraz prędkości wirnika ω_r . Na podstawie wymienionych wartości wejściowych procesor sygnałowy oblicza wartość częstotliwości f_e napięcia stojana, przesyłanej do przetwornicy częstotliwości.



Rys. 19. Schemat blokowy realizacji sprzętowej układu sterowania symulatora turbiny wiatrowej

7. WNIOSKI

W pracy zaproponowano symulator turbiny wiatrowej opierający się na sterowaniu momentem obrotowym silnika indukcyjnego. Algorytm sterowania umożliwia odwzorowanie zachowania turbiny wiatrowej również w stanach dynamicznych, co wiąże się z odtworzeniem momentu bezwładności turbiny wiatrowej.

Opracowane stanowisko laboratoryjne może być przydatne w badaniach i testach przekształtników energoelektronicznych pośredniczących w przekazywaniu energii do sieci oraz algorytmów sterowania tym procesem.

Poprawność układu sterowania zbadano symulacyjnie poprzez sprawdzenie jego odpowiedzi na różne warunki wietrzne. Przebiegi momentu oraz prędkości silnika indukcyjnego wskazują, że układ dąży do osiągnięcia wartości zadanych wyznaczanych w torze automatycznej regulacji.

W artykule przedstawiono realizację sprzętową stanowiska laboratoryjnego, uwzględniającą układ napędowy oraz sterownik oparty na mikroprocesorze sygnałowym TMS320F2812.

Dalsze prace nad projektem skupiać się będą na oprogramowaniu sterownika mikroprocesorowego i weryfikacji wyników symulacji z przebiegami otrzymanymi na drodze badań laboratoryjnych.

LITERATURA

1. Blaabjerg F., Ma K.: Future on Power Electronics for Wind Turbine Systems. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 1, nr 3, str. 139-152, Wrzesień 2013.
2. Bogalecka E., Sznigir J.: Laboratoryjny emulator silnika wiatrowego zbudowany w oparciu o silnik indukcyjny. Przegląd Elektrotechniczny, nr 11, str. 38–41, 2005.
3. Kojabadi M. H., Chang L., Boutot T.: Development of a Novel Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion Systems Using an Inverter-Controlled Induction Motor. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, nr 3, wrzesień 2004.
4. Kulesza K., Krzemiński Z., Blecharz K.: Model Elektrowni Wiatrowej Pracującej na Sieć Sztynną – Badania Symulacyjne. Modelowanie i Symulacja '2004, Kościelisko, 21-25 czerwca 2004.
5. Neammanee B., Sirisumrannukul S., Chatrana S.: Development of a Wind Turbine Simulator for Wind Generator Testing. International Energy Journal, nr 8, str. 21-28, 2007.
6. Yaoqin Jia, Zhaoan Wang, Zhongqing Yang: Experimental Study of Control Strategy for Wind Generation System. IEEE, str. 1202-1207, 2007.
7. Mohod S. W., Aware M. V.: Laboratory Development of Wind Turbine Simulator Using Variable Speed Induction Motor. International Journal of Engineering and Technology, vol. 3, nr 5, str. 73-82, 2011.
8. Uracz P., Koralewski B.: Modelowanie Turbin Wiatrowych z Wykorzystaniem Charakterystyk Współczynnika Mocy. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 59, 2006.

Przyjęto do druku dnia 13.01.2016 r.

SMALL WIND TURBINE SIMULATOR

Wojciech MATELSKI, Eugeniusz ŁOWIEC, Stanisław ABRAMIK

ABSTRACT *The article presents a concept of the wind turbine simulator, built on the basis of cage induction motor, supplied from a frequency converter. The model assumes control of the engine torque, taking into account the moment of inertia of the simulated turbine. Functionality of the control structure has been verified using PSIM simulation software. Performance of the system for different wind conditions has been shown. Results of research proof that speed and turbine power are well tracked by the motor – wind emulator. The paper presents hardware implementation of the simulator as well.*

Keywords: *induction motors, wind energy, simulation*



Mgr inż. Wojciech MATELSKI ukończył studia w 2013 roku na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej o specjalności Przetwarzanie i Użytkowanie Energii Elektrycznej. Zatrudniony w Oddziale Gdańskim Instytutu Elektrotechniki w Pracowni Odnawialnych Źródeł Energii. W swojej pracy zajmuje się symulacją obwodów energoelektronicznych oraz problemami napędu elektrycznego i energetyki odnawialnej. Obecnie jest uczestnikiem studiów doktoranckich w Instytucie Elektrotechniki.

Dr inż. Eugeniusz ŁOWIEC ukończył studia w 1972 roku na Wydziale Elektroniki Politechniki Gdańskiej. Do 1988 roku pracuje w Akademii Marynarki Wojennej zajmując się automatyką okrętową i automatyką komór hiperbarycznych. Od 1988 roku jest zatrudniony w Oddziale Gdańskim Instytutu Elektrotechniki. Aktualnie zajmuje się problematyką poprawy jakości energii elektrycznej i zastosowaniami superkondensatorów. Jest autorem wielu artykułów, patentów i wdrożeń.



Dr inż. Stanisław ABRAMIK ukończył studia w 1997 roku na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. W 2003 roku obronił pracę doktorską i uzyskał stopień doktora nauk technicznych w zakresie elektrotechniki i Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. Od 2004 pracuje w Oddziale Gdańskim Instytutu Elektrotechniki. Aktualnie zajmuje się zagadnieniami związanymi z energetyką odnawialną, energooszczędnym oświetleniem LED oraz pojazdami elektrycznymi. Jest autorem wielu prac wyróżnionych na międzynarodowych wystawach i konkursach.