

# Charakterystyki elektromechaniczne turboszespołu wiatrowego z generatorem synchronicznym

**Streszczenie.** Artykuł dotyczy modelowania zjawisk elektromechanicznych w turboszespołach wiatrowych. Zaprezentowano, opracowany w środowisku programu PSCAD, model turboszespołu z generatorem synchronicznym połączonym z siecią zasilającą poprzez inwerter ze sterowaniem PWM. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych ilustrujące zmiany wielkości elektromechanicznych przy różnych zmiennościach prędkości wiatru. Otrzymane charakterystyki mechaniczne turboszespołu zostały zweryfikowane pomiarami wykonanymi dla obiektu rzeczywistego.

**Abstract.** The article concerns the modeling of electromechanical phenomena in the wind turbine. Presented, developed using the program PSCAD, model of the wind turbine with synchronous generator connected to the grid via a PWM inverter. Paper presents the results of simulation studies showing changes in the electromechanical quantities at different variation of wind speed. Received electromechanical characteristics of turbine have been verified measurements made for the real object. (**Electromechanical characteristics of the wind turbine with synchronous generator**).

**Słowa kluczowe:** energia wiatrowa, symulator turboszespołu wiatrowego, krzywa mocy, układy regulacji.

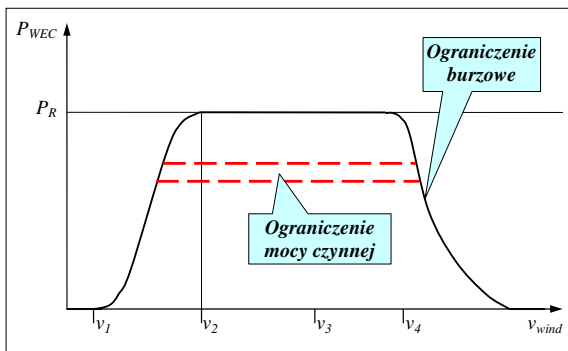
**Keywords:** wind energy, wind turbine simulator, power curve, control systems.

doi:10.12915/pe.2014.12.04

## Wstęp

Turboszespoły wiatrowe z generatorami synchronicznymi znajdują coraz szersze zastosowanie w polskiej energetyce wiatrowej. Spowodowane jest to bardzo dobrymi właściwościami regulacyjnymi [1], pozwalającymi na ich wykorzystanie przez operatorów systemów elektroenergetycznych w procesach regulacji sieciowych.

Podstawową charakterystyką techniczną turboszespołu wiatrowego jest krzywa mocy  $P = f(v)$ , czyli zależność wytwarzanej mocy od prędkości wiatru. Przykładową krzywą mocy turboszespołu przedstawiono na rysunku 1 [2].



Rys. 1. Przykładowa krzywa mocy turboszespołu [2]

W zależności od prędkości wiatru występują trzy zakresy pracy turboszespołu wiatrowego (rys. 1) obejmujące:

- stan jałowy (oczekiwania) – przy prędkości wiatru mniejszej od  $v_{min}$  ( $v_1$  na rys. 1),
- pracę normalną – przy prędkości wiatru w zakresie  $v_1 < v < v_4$ ,
- pracę przy tzw. prędkości burzowej wiatru, gdy  $v > v_4$ .

W zakresie prędkości  $v_2 < v < v_4$  jest realizowana regulacja mocy poprzez zmianę kąta natarcia łopatek wirnika (*pitch control*), mająca na celu utrzymanie stałej mocy turboszespołu. Jeżeli prędkość wiatru przekracza  $v_4$  regulacja ta powoduje stałe zmniejszanie mocy (*storm control*) aż do stanu pracy jałowej.

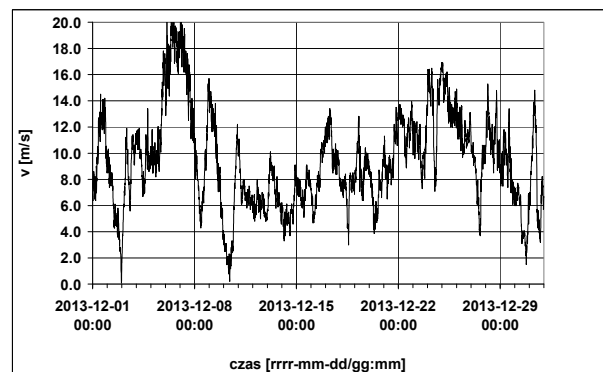
Zastosowanie w torze przetwarzania energii inwerterów z funkcją STATCOM [3] pozwala na wytwarzanie mocy biernej, niezależnie od prędkości wiatru, w zakresie ograniczonym dopuszczalną obciążalnością prądową elementów turboszespołu.

Operator systemu może mieć do dyspozycji regulację polegającą na ograniczeniu wytwarzanej mocy czynnej

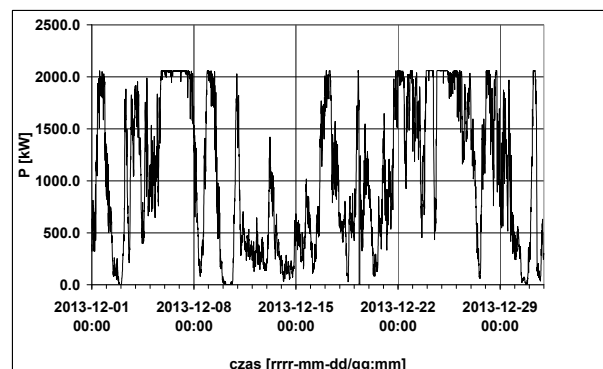
(poprzez wykorzystanie funkcji *pitch control*) oraz sterowanie wartością wytwarzanej mocą bierną (wykorzystanie właściwości funkcji STATCOM)

## Pomiarowa krzywa mocy

Dla określenia rzeczywistej krzywej mocy wybranego turboszespołu wiatrowego typu E-70 Enercon [4] wykorzystano wyniki pomiarów pobrane z systemu SCADA dedykowanego do monitoringu i sterowania pracą elektrowni wiatrowej Kamieńsk. Zmiany prędkości wiatru w okresie pomiarowym (grudzień 2013 r.) pokazano na rysunku 2, a odpowiadające im zmiany wytwarzanej mocy czynnej na rysunku 3. Prezentowane wyniki pomiarów są wartościami uśrednionymi w przedziałach 10. minutowych.

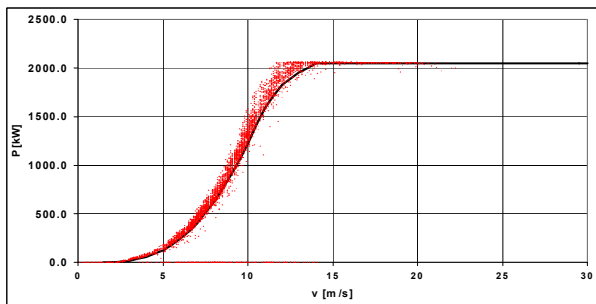


Rys. 2. Zmiany prędkości wiatru w okresie pomiarowym



Rys. 3. Zmiany mocy czynnej wiatru w okresie pomiarowym

Na podstawie pomiarów wyznaczono rzeczywistą krzywą mocy  $P = f(v)$  badanego turboszespołu, pokazaną na rysunku 4 na tle krzywej mocy gwarantowanej przez producenta.

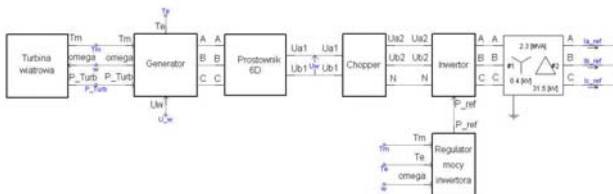


Rys. 4. Pomiarowa charakterystyka  $P = f(v)$  badanego turboszespołu

### Model turboszespołu

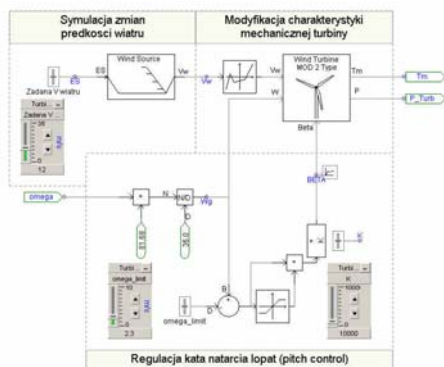
W literaturze można spotkać opisy wielu modeli turboszespołów różniących się w zależności od założonego celu badań symulacyjnych, typu modelowanego turboszespołu i wykorzystywanego programu obliczeniowego [5 - 10]. Do badań na potrzeby artykułu wykorzystano model turboszespołu wiatrowego z generatorem synchronicznym, zbudowany w środowisku programu PSCAD [11], którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 5. W symulatorze tym wykorzystano dane techniczne (krzywe mocy, prędkości kątowne, napięcia, prądy i moce znamionowe, dane układów sterowania i regulacji) turboszespołu typu E-70 [4] pracującego w elektrowni wiatrowej Kamieńsk. Szczegółowy opis modelu podano w [12].

Elementami składowymi modelu są: model turbiny wiatrowej, model generatora, model układu przetwarzania energii AC/DC/AC (składający się z prostownika, chopper'a i inwertora PWM) oraz transformator łączący turbosespół z siecią SN. Osobną część modelu stanowi regulator mocy inwertora odpowiedzialny za wyprowadzenie mocy z turboszespołu.



Rys. 5. Schemat blokowy modelu turboszespołu [12]

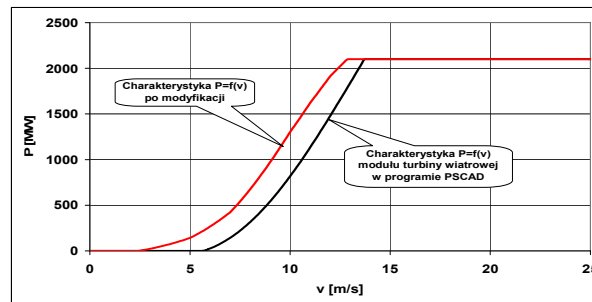
Model turbiny wiatrowej przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Model turbiny wiatrowej [12]

Podstawowym elementem tego modelu jest moduł „Wind Turbine” pochodzący z biblioteki programu [11]. Charakterystyki mechaniczne  $P = f(v)$  i  $T_m = f(v)$  tego modułu przy znamionowej prędkości obrotowej ( $\omega = 1,0$  pu) i danych przyjętych dla turboszespołu E70 nie są zgodne z charakterystykami producenta [3]. W celu dostosowania charakterystyk mechanicznych turbiny zaimplementowano w modelu element, reprezentujący nieliniową charakterystykę zmieniającą skalę prędkości wiatru.

Na rysunku 7 przedstawiono porównanie charakterystyk mechanicznych modelowanej turbiny wiatrowej przed i po jej modyfikacji.



Rys. 7. Porównanie charakterystyk mechanicznych  $P = f(v)$  modelowanej turbiny wiatrowej przed i po modyfikacji

Aktywacja układu regulacji kąta natarcia łopaty turbiny  $\beta$ , w którym zastosowano regulator proporcjonalny, następuje po przekroczeniu prędkości kątownej wirnika turbiny równej  $\omega = 2,3$  rad/s, co odpowiada znamionowej prędkości obrotowej turboszespołu E-70 ( $n = 22$  obr/min). Ograniczenie prędkości kątownej ma na celu ochronę turbiny przed nadmiernymi naprężeniami mechanicznymi. Regulację kąta natarcia łopaty turbiny wykorzystuje się również do ograniczania mocy czynnej wytwarzanej przez turbosespół.

W modelu turbiny wiatrowej wykorzystano moduł „Wind Source”, pochodzący z biblioteki programu PSCAD [11], umożliwiający programowanie zmiennych w czasie przebiegów wiatru o zróżnicowanym charakterze (podmuchy, turbulencje).

Działanie generatora w stanach przejściowych (zarówno elektromagnetycznych, jak i elektromechanicznych) jest opisane układem sześciu równań różniczkowych (1), sformułowanych dla uzwojeń stojana i wirnika oraz równaniem równowagi momentów (2).

$$(1) \quad \begin{cases} \frac{d\Psi_u}{dt} + R_u I_u = -u_u \\ \frac{d\Psi_v}{dt} + R_v I_v = -u_v \\ \frac{d\Psi_w}{dt} + R_w I_w = -u_w \\ \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f I_f = u_f \\ \frac{d\Psi_D}{dt} + R_D I_D = 0 \\ \frac{d\Psi_Q}{dt} + R_Q I_Q = 0 \end{cases}$$

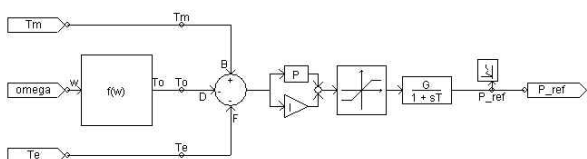
W równaniu (1) przyjęto jednakowe rezystancje fazowe generatora  $R_u = R_v = R_w$ , które oznaczono jako  $R$  oraz przyjęto ogólnie  $u_k$  – napięcie na zaciskach uzwojenia  $k$  o rezystancji  $R_k$ , w którym płynie prąd  $I_k$  i z którym jest skojarzony strumień  $\Psi_k$ .

$$(2) \quad J \frac{d\omega}{dt} = (T_m - T_0) - T_e$$

gdzie:  $J$  – moment bezwładności wirnika generatora i turbiny,  $\omega$  – elektryczna prędkość kątowna wirnika,  $T_m$  – moment napędowy mechaniczny,  $T_e$  – moment elektromagnetyczny,  $T_0$  – moment strat.

W modelu generatora zastosowano układ regulacji prądu wzbudzenia z regulatorem PI zapewniający stały stosunek napięcia do częstotliwości ( $U/f = const$ ), co pozwala na zachowanie stałych warunków magnetycznych przy zmiennej prędkości obrotowej generatora  $\omega$ .

Model układu przetwarzania energii AC/DC/AC składa się z sześciopulsowego prostownika diodowego, chopper'a stabilizującego napięcie w obwodzie prądu stałego DC oraz w pełni sterowanego inwertera PWM został szczegółowo opisany w [12]. Podstawowy układ regulacji mocy inwertera PWM wykorzystuje podane wcześniej równanie równowagi momentów (2), które jest realizowane zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 8.



Rys. 8. Układ regulacji mocy inwertera PWM

Sygnałem wyjściowym z regulatora jest wartość referencyjna mocy  $P_{ref}$ , jaka powinna być wprowadzona do sieci zasilającej przez inwerter. Moc ta powinna spełniać zależność:

$$(3) \quad P_{ref} = P_g - \Delta P_{strat}$$

gdzie:  $P_g$  – moc generatora turboszespołu wiatrowego,  $\Delta P_{strat}$  – straty mocy w układzie przetwarzania energii od generatora do inwertera.

Sygnał mocy referencyjnej jest sygnałem zadanym dla obwodu regulacji, który wyznacza kąt pomiędzy wektorem napięcia na wyjściu inwertera, a wektorem napięcia sieci.

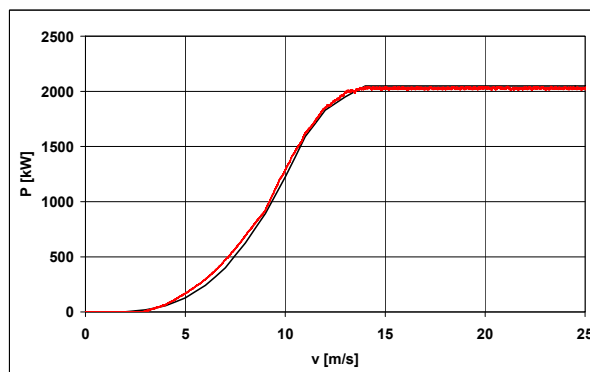
### Badania symulacyjne

Badania symulacyjne zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu, opracowanego opisanego wyżej modelu turboszespołu wiatrowego przyłączonego do sieci elektroenergetycznej. W celu weryfikacji modelu wyznaczono symulacyjnie krzywe mocy  $P = f(v)$  turboszespołu. Badania zrealizowano według następującej procedury: wyznaczono stan ustalony pracy turboszespołu przy prędkości wiatru  $v = 25$  m/s, a następnie, zmieniając liniowo prędkość wiatru od wartości  $v_1 = 25$  m/s do wartości  $v_2 = 0$  m/s, przy gradiencie zmian prędkości równym  $-0,5$  m/s<sup>2</sup>, wyznaczono symulacyjnie krzywą mocy turboszespołu, pokazaną na rysunku 9 w porównaniu z krzywą mocy producenta.

Z porównania charakterystyk  $P = f(v)$  pomiarowej, podanej przez producenta (rys. 4) i symulacyjnej (rys. 9) wynika, że opracowany symulator turboszespołu prawidłowo odwzorowuje modelowany obiekt rzeczywisty.

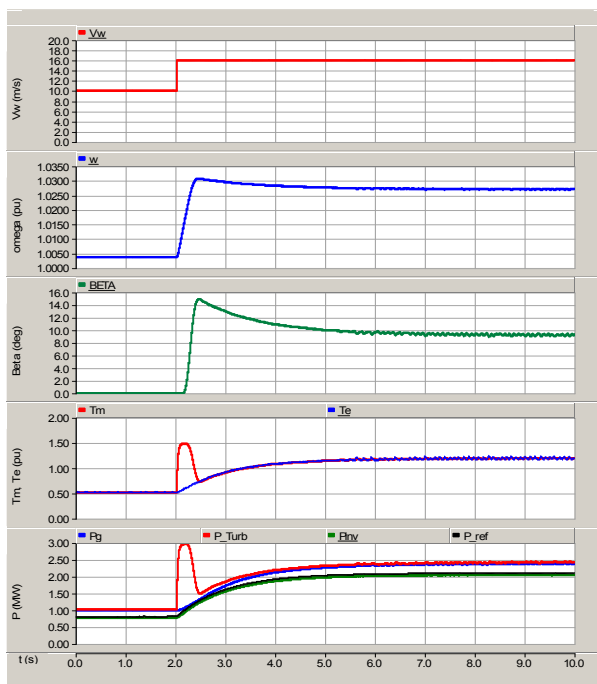
Celem kolejnych badań było sprawdzenie poprawności działania modelu w zakresie odwzorowania procesów elektromechanicznych zachodzących w turboszespołe wiatrowym przy różnorodnych zmianach prędkości wiatru. Badano reakcję turboszespołu na skokową zmianę prędkości

wiatru oraz cykliczne podmuchy wiatru powodujące aktywację układu regulacji kąta natarcia łopatek turbiny wiatrowej. Wyniki badań pokazano na rysunkach 10 i 11.



Rys. 9. Porównanie symulacyjnej charakterystyki  $P = f(v)$  badanego turboszespołu z krzywą mocy podaną przez producenta

Początkowe warunki pracy ustalonej w obu rozpatrywanych przypadkach (rys. 10 i 11) określone zostały dla prędkości wiatru  $v = 10$  m/s, przy której prędkość kątowna turboszespołu wynosiła  $\omega = 1,004$  pu, kąt natarcia łopatek turbiny był równy  $\beta = 0^\circ$ , moment mechaniczny turboszespołu  $T_m = 0,5$  pu, był równoważony przez moment elektromagnetyczny  $T_e$ , moc wytwarzana przez generator turboszespołu wynosiła  $P_g = 1$  MW, a moc wprowadzana do sieci przez inwerter, równa mocy referencyjnej wyznaczonej przez układ regulacji mocy, wynosiła  $P_{inv} = P_{ref} = 0,84$  MW.

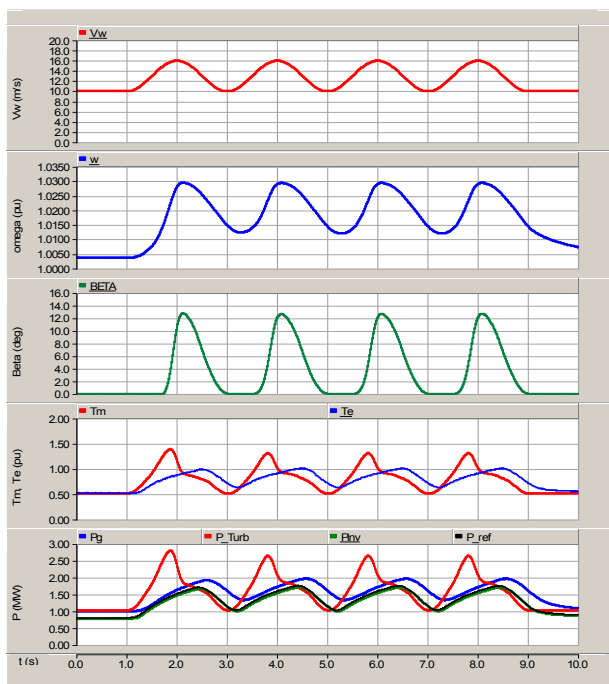


Rys. 10. Zmiany wartości wielkości elektromechanicznych turboszespołu przy skokowej zmianie prędkości wiatru

W pierwszym przypadku prędkość wiatru wzrosła skokowo do wartości  $v = 16$  m/s. Powoduje to wzrost momentu mechanicznego turboszespołu do wartości  $T_m = 1,5$  pu. Na skutek nierównowagi momentów następuje wzrost prędkości kątownej turboszespołu. Po przekroczeniu przez prędkość kątowną wartości granicznej  $\omega_g = 1,014$  pu uaktywnia się układ regulacji kąta natarcia łopatek turbiny ( $\beta$ ). W analizowanym przypadku następuje to z opóźnieniem około 0,2 sekundy w stosunku do chwili skokowej zmiany

prędkości wiatru. Wartość kąta natarcia łopaty turbiny wzrasta i następuje ograniczenie wartości momentu mechanicznego, aż do chwili zrównania się z wartością momentu elektromagnetycznego.

Procesy regulacyjne dotyczące wartości kąta natarcia łopaty turbiny i wartości mocy referencyjnej dla inwertera przebiegają równocześnie prowadząc do nowego stanu ustalonego, w którym prędkość kątowna turboszespołu wynosi  $\omega = 1,027$  pu, kąt natarcia łopaty turbiny  $\beta = 9,8^\circ$ , moment mechaniczny turboszespołu  $T_m = 1,2$  pu jest równoważony przez moment elektromagnetyczny  $T_e$ , moc wytwarzana przez generator turboszespołu jest równa  $P_g = 2,43$  MW, a moc wprowadzana do sieci przez inwerty (równa mocy referencyjnej), wynosi  $P_{inv} = P_{ref} = 2,08$  MW.



Rys. 11. Zmiany wartości wielkości elektromechanicznych turboszespołu przy podmuchach wiatru

W drugim przypadku (rys. 11) prędkość wiatru zmieniała się sinusoidalnie w zakresie od 10 m/s do 16 m/s, a czas trwania (okres) jednego podmuchu wynosił 2 sekundy. Podmuchy wiatru powodowały cykliczne zmiany wartości momentu napędowego i odpowiadające im zmiany wartości prędkości kątownej turboszespołu. W chwilach, gdy prędkość kątowna przekraczała wartość graniczną  $\omega_g = 1,014$  pu, następowała aktywacja układu regulacji kąta natarcia łopaty turbiny. Wartość kąta natarcia łopaty turbiny  $\beta$  zwiększała się powodując ograniczenie (zmniejszanie się) momentu napędowego. Prędkość kątowna turboszespołu wzrastała nadal do chwili, gdy wartość momentu napędowego stawała się mniejsza od aktualnej wartości momentu elektromagnetycznego (moment dynamiczny zmienił znak na ujemny). Od tej chwili następowało również zmniejszanie się wartości prędkości kątownej turboszespołu. Gdy prędkość kątowna zmniejszyła się poniżej wartości granicznej  $\omega_g$  kąt natarcia łopaty turbiny przyjmował wartość  $\beta = 0$  (następowała dezaktywacja układu regulacji kąta natarcia łopaty turbiny). Prędkość kątowna turboszespołu w okresie trwania podmuchów zmieniała się w zakresie od 1,012 do 1,03 pu, natomiast wartość mocy czynnej wprowadzanej przez inwerty do sieci zasilającej ( $P_{inv}$ ) w zakresie od 1,0 MW do 1,7 MW podążając za wartością referencyjną ( $P_{ref}$ ) wyznaczaną w układzie regulacji mocy inwertera.

Prezentowane na rysunkach 10 i 11 zmiany wartości wielkości elektromechanicznych w stanach dynamicznych pracy turboszespołu potwierdzają prawidłowy przebieg procesów regulacyjnych.

## Podsumowanie

W artykule zaprezentowano zbudowany w środowisku programu PSCAD model (symulator) turboszespołu wiatrowego typu E-70 produkcji firmy ENERCON. W symulatorze odwzorowano dokładne modele elementów składowych: turbiny wiatrowej, generatora, prostownika, chopper'a, inwertera i transformatora wraz z koniecznymi układami sterownia i regulacji. Podstawowy układ regulacji wykorzystuje równanie równowagi momentów, z którego wynika wartość referencyjna mocy  $P_{ref}$ , jaka powinna być wprowadzona do sieci zasilającej przez inwerty.

Badania symulacyjne zostały zweryfikowane pomiarowo, a z porównania charakterystyk  $P = f(v)$  pomiarowej (rys. 4) i symulacyjnej (rys. 9) wynika, że opracowany symulator prawidłowo odwzorowuje modelowany obiekt rzeczywisty. Wyniki badań symulacyjnych dotyczących przebiegu procesów regulacyjnych w stanach dynamicznych pracy turboszespołu potwierdzają prawidłowe działanie symulatora.

## LITERATURA

- [1] Anuszczyk J., Pawelek R., Terlecki B., Wasiak I., Analiza możliwości zarządzania energią w elektrowniach wiatrowych. *Rynek Energii*, 92 (2011), nr 1, 97-102
- [2] Pawelek R., Terlecki B., Wasiak I.: Aspekty techniczne i ekonomiczne wykorzystania farm wiatrowych dla realizacji usług pomocniczych. *Rynek Energii*, 98 (2012), nr 1, 21-27
- [3] ENERCON Wind Energy Converter (WEC) – User Model Documentation for PSS TME, Aurich, Germany, 2009.
- [4] ENERCON Wind Turbines, Technology and Service. ENERCON GmbH, Aurich, Germany, 2009.
- [5] Muller S., Deicke M., Rik W., De Doncker, Doubly fed induction generator systems for wind turbines. *IEEE Ind. Appl. Magazine*, 8 (2002), No. 3, 26-33.
- [6] Hansen A.D, Sørensen P., Blaabjerg F., Becho J., Dynamic Modelling of Wind Farm Grid Interaction, *Wind Engineering*, 26 (2002), No. 4, 191-208
- [7] Hansen A.D, Sørensen P., Iov F., Blaabjerg F., Initialisation of Grid-Connected Wind Turbine Models in Power-System Simulations, *Wind Engineering*, 27 (2003), No. 1, 21-38
- [8] Kulesza K., Krzemiński Z., Blecharz K., Model elektrowni wiatrowej pracującej na sieć sztywną – badania symulacyjne, *Konf. Modelowanie i Symulacja '2004* (MiS-3), 1-8, Kościelisko, 21-25.06.2004 r.
- [9] Abo-Khalil A.G., Dohg Chonn L., Development of Wind Turbine Simulators Using PSCAD, *Przegląd Elektrotechniczny*, 82 (2006), nr 2, 107-112
- [10] Bogalecka E., Kosmecki M., Control of Reactive Power in Double-Fed Machine Based Wind Park, *Proc. of 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008)*, 1975-1980, Poznań (Poland), Sept. 1-3, 2008
- [11] PSCAD - Power Systems Computer Aided Design. User's Guide on the Use of PSCAD, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2003
- [12] Terlecki B., Analiza możliwości regulacyjnych parku elektrowni wiatrowych w systemie elektroenergetycznym. Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, 2013, s. 132

**Autorzy:** dr inż. Ryszard Pawelek, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [ryszard.pawelek@p.lodz.pl](mailto:ryszard.pawelek@p.lodz.pl); dr inż. Bogusław Terlecki, PGE Energia Odnawialna S.A., ul. Ogrodowa 59a, 00-876 Warszawa, E-mail: [boguslaw.terlecki@ewk.pl](mailto:boguslaw.terlecki@ewk.pl); prof. dr hab. inż. Jan Anuszczyk, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [jan.anuszczyk@p.lodz.pl](mailto:jan.anuszczyk@p.lodz.pl)