

**Krzysztof BLECHARZ**

**Zbigniew KRZEMIŃSKI**

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

## **Obserwator prędkości maszyny dwustronnie zasilanej**

### **Abstract.**

*The paper describes the new structure of speed observer for doubly-fed induction generator. The structure of speed observer is based on a vector model of asynchronous machine and on theory of Luenberger observers.*

*The structure of the speed observer with exact disturbance model and gain coefficients depending on rotor frequency has been proposed. The synthesis of a power control system the multiscalar model of induction machine was used. The graphs of simulation results for the speed errors, active and reactive power generated by the generator, for under and over synchronous speed of the machine shaft, are presented.*

**Słowa kluczowe:** maszyna dwustronnie zasilana (MDZ), obserwator prędkości

### **Wstęp**

Układy generatorowe z pierścieniową maszyną indukcyjną zasilaną od strony wirnika przez dwukierunkowy przekształtnik energoelektroniczny są szeroko stosowane w energetyce wiatrowej. Moce czynna i bierna przekazywane do systemu elektroenergetycznego od strony stojana generatora regulowane są niezależnie i charakteryzują się wysoką jakością przebiegów przejściowych. Rozwiązania takie umożliwiają pracę generatora w szerokim zakresie prędkości obrotowej wału zarówno przy prędkości podsynchronicznej jak i nadsynchronicznej.

Do syntezy układu regulacji mocy generatora niezbędna jest znajomość kąta położenia wirnika względem stojana. W zastosowaniach przemysłowych zaobserwować można tendencję do eliminacji czujników mechanicznych w celu poprawy niezawodności układu generatorowego. Informacja o kącie położenia wirnika może być otrzymana na podstawie pomiarów za pomocą enkodera, jednakże rozwiązanie to podwyższa koszty układu oraz zmniejsza jego niezawodność. Drgania układu napędowego mogą powodować uszkodzenia enkodera. Istotne znaczenie mają również zakłócenia elektromagnetyczne oddziałujące na przewód doprowadzający sygnał pomiarowy z enkodera do przekształtnika, które wpływają na dokładność działania układu regulacji.

W literaturze [1, 2, 3, 4] odnaleźć można różne sposoby estymowania prędkości wirowania wału maszyny dwustronnie zasilanej. Algorytmiczne metody estymacji prędkości można ogólnie podzielić na dwa rodzaje. Pierwszy rodzaj to algorytmy odtwarzające prędkość opracowane na podstawie zależności modelu matematycznego, tzw. symulatory. Rozwiązania, te są czułe na zmianę wartości parametrów obiektu w trakcie pracy generatora. W publikacji [1] zaprezentowano zbiorcze wyniki badań dotyczące sposobów odtwarzania prędkości za pomocą symulatorów z wykorzystaniem układów z różnymi adaptacyjnymi modelami odniesienia (ang. Model Reference Adaptive System). Analizie poddano kilka układów, w których parametry modelu

adaptacyjnego korygowano w zależności od błędów odtwarzania strumienia stojana, strumienia wirnika, prądu stojana, prądu wirnika.

Drugi rodzaj algorytmów estymacji prędkości to obserwatory z pełnym modelem matematycznym generatora i dodatkowym sprzężeniem zwrotnym od wielkości dostępnej pomiarowo. Zastosowanie sprzężenia znacznie poprawia szybkość i dokładność działania algorytmu. W publikacji [3] prędkość obliczana jest na podstawie odtworzonej w obserwatorze, wartości strumienia stojana oraz błędu pomiędzy wartością mierzoną prądu wirnika, a wartością odtworzoną w obserwatorze. Z zastosowaniem teorii stabilności Lapunova zaproponowano wyrażenie na obliczanie prędkości, które wykorzystano w mechanizmie adaptacyjnym z regulatorem typu PI. Podobny sposób zastosowali autorzy publikacji [4].

W niniejszym referacie zaprezentowano nowe podejście do estymacji prędkości maszyny dwustronnie zasilanej. Opracowano obserwator prędkości w równaniach, którego siłę elektromotoryczną maszyny potraktowano jako zakłócenie. Rozwiązanie tego rodzaju, stosowane dotąd do estymacji prędkości silników asynchronicznych [5], charakteryzuje się dużą dokładnością w szerokich granicach zmian prędkości wału maszyny.

### Model matematyczny maszyny dwustronnie zasilanej

Maszyna indukcyjna jest złożonym obiektem sterowania o strukturze nieliniowej. Do syntezy układów regulacji maszyny dwustronnie zasilanej wykorzystuje się poniższy model matematyczny otrzymany po przyjęciu szeregu założeń upraszczających:

$$(1) \quad \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} = a_{11}\bar{\Psi}_S + a_{12}\bar{i}_R - j\omega_a\bar{\Psi}_S + \bar{u}_S,$$

$$(2) \quad \frac{d\bar{i}_R}{dt} = a_{21}\bar{i}_R - j(\omega_a - \omega_r)\bar{i}_R + j\omega_r a_{22}\bar{\Psi}_S + a_{23}\bar{\Psi}_S - a_{22}\bar{u}_S + a_{24}\bar{u}_R,$$

$$(3) \quad \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left( \frac{a_{22}}{a_{24}} \text{Im} \left[ \bar{\Psi}_S^* \bar{i}_R \right] - m_O \right),$$

gdzie  $\bar{\Psi}_S, \bar{i}_R, \bar{u}_S, \bar{u}_R$  są przestrzennymi wektorami strumienia skojarzonego stojana, prądu wirnika, napięcia zasilania stojana i napięcia zasilania wirnika,  $m_O$  jest zewnętrznym momentem mechanicznym,  $\tau$  jest czasem względnym,  $\omega_r$  jest prędkością wirowania wału generatora,  $\omega_a$  jest prędkością wirowania układu odniesienia,  $J$  jest momentem bezwładności. Parametry występujące w równaniach maszyny zdefiniowano następująco:

$$(4) \quad a_{11} = -\frac{R_S}{L_S}, \quad (5) \quad a_{12} = R_S \frac{L_m}{L_S}, \quad (6) \quad a_{21} = -\left( \frac{L_S^2 R_R + R_S L_m^2}{L_S \omega_S} \right),$$

$$(7) \quad a_{22} = \frac{L_m}{\omega_S}, \quad (8) \quad a_{23} = \frac{R_S L_m}{L_S \omega_S}, \quad (9) \quad a_{24} = \frac{L_S}{\omega_S},$$

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

$$(10) \quad w_s = L_S L_R - L_m^2,$$

gdzie  $R_S, R_R$  są rezystancjami obwodu stojana i wirnika,  $L_S, L_R, L_m$  są indukcyjnościami stojana i wirnika oraz indukcyjnością wzajemną. Wszystkie zmienne i parametry zostały wyrażone w jednostkach względnych bezwymiarowych. Wielkości bazowe dla układu bezwymiarowego przyjęto zgodnie z [7].

### Obserwator prędkości

Idea obserwatora prędkości, w której siła elektromotoryczna traktowana jest jako zakłócenie, została zaproponowana po raz pierwszy w pracy [5]. Algorytm obserwatora zastosowano do odtwarzania prędkości obrotowej maszyny indukcyjnej klatkowej.

Zaproponowana struktura obserwatora prędkości jest oparta na teorii liniowego obserwatora Luenbergera pełnego rzędu. Równia obserwatora wyprowadzono na podstawie równań modelu matematycznego maszyny asynchronicznej (1)-(2) w nieruchomym układzie współrzędnych względem wirnika ( $\omega_a = \omega_r$ ),

Algorytm obserwatora w prezentowanej postaci umożliwia odtworzenie prędkości wału generatora, składowych wektora strumienia skojarzonego stojana oraz składowych wektora prądu wirnika. W zależnościach obserwatora występuje jako zakłócenie siła elektromotoryczna maszyny zdefiniowana następująco:

$$(11) \quad z_x = w_r \Psi_{sa}, \quad (12) \quad z_y = w_r \Psi_{sb}.$$

Siła elektromotoryczna jest odtwarzana w dodatkowych integratorach i oznaczona jest jako  $\zeta_x, \zeta_y$ .

Równania obserwatora stanu dla maszyny dwustronnie zasilanej dla układu  $\alpha\beta$  przyjmuje postać:

$$(13) \quad \frac{d\hat{\Psi}_{sa}}{dt} = a_{11}\hat{\Psi}_{sa} + a_{12}\hat{i}_{ra} + u_{sa} + z_y - k_2(\hat{w}_r\hat{\Psi}_{sb} - z_y),$$

$$(14) \quad \frac{d\hat{\Psi}_{sb}}{dt} = a_{11}\hat{\Psi}_{sb} + a_{12}\hat{i}_{rb} + u_{sb} - z_x + k_2(\hat{w}_r\hat{\Psi}_{sa} - z_x),$$

$$(15) \quad \frac{d\hat{i}_{ra}}{dt} = a_{21}\hat{i}_{ra} - a_{22}z_y + a_{23}\hat{\Psi}_{sa} - a_{22}u_{sa} + a_{24}u_{ra} + k_3(i_{ra} - \hat{i}_{ra}),$$

$$(16) \quad \frac{d\hat{i}_{rb}}{dt} = a_{21}\hat{i}_{rb} + a_{22}z_x + a_{23}\hat{\Psi}_{sb} - a_{22}u_{sb} + a_{24}u_{rb} + k_3(i_{rb} - \hat{i}_{rb}),$$

$$(17) \quad \frac{dz_x}{dt} = k_1(i_{rb} - \hat{i}_{rb}),$$

$$(18) \quad \frac{dz_y}{dt} = -k_1 (i_{ra} - \hat{i}_{ra}),$$

Rozbudowanie modelu zakłóceń z uwzględnieniem dynamiki zmian strumienia stojana umożliwi zwiększenie dokładności obserwatora prędkości. Wyznaczając pochodne wyrażeń (11)-(12) i przyjmując założenie upraszczające, że pochodna prędkości względem czasu jest równa zero w krótkim przedziale czasowym, można dodatkowe równania integratorów zapisać w następujący sposób:

$$(19) \quad \frac{dz_x}{dt} = k_1 (i_{rb} - \hat{i}_{rb}) + \hat{w}_r (a_{11} \hat{\Psi}_{sa} + a_{12} \hat{i}_{ra} + u_{sa} + z_y),$$

$$(20) \quad \frac{dz_y}{dt} = -k_1 (i_{ra} - \hat{i}_{ra}) + \hat{w}_r (a_{11} \hat{\Psi}_{sb} + a_{12} \hat{i}_{rb} + u_{sb} - z_x).$$

Wykorzystując wyrażenia (11)-(12) określające siłę elektromotoryczną rotacji, uzyskano po przekształceniach wyrażenie na prędkość wirowania wału maszyny dwustronnie zasilanej odtwarzaną w obserwatorze stanu zdefiniowane następująco:

$$(21) \quad \hat{w}_r = \frac{z_x \Psi_{sa} + z_y \Psi_{sb}}{\Psi_{sa}^2 + \Psi_{sb}^2}.$$

Wartość kąta pomiędzy wirnikiem a stojanem niezbędna do transformacji odpowiednich składowych wektorów w układzie regulacji uzyskano poprzez pomiar wektora prądu stojana w układzie stojana i porównaniu tego samego wektora prądu w układzie współrzędnych wirnika obliczonego w obserwatorze.

Przyjęto, że wykorzystane w obserwatorze parametry maszyny są znane i zostały wyznaczone w innym algorytmie.

#### Układ regulacji mocy czynnej i biernej

Proponowany algorytm obserwatora prędkości zastosowano w układzie sterowania mocą czynną i bierną generatora. Do syntezy układu regulacji mocy maszyny dwustronnie zasilanej wykorzystano znany w literaturze model multiskalarny typu „z” maszyny indukcyjnej [6]. Zastosowany układ regulacji charakteryzują się dobrymi właściwościami dynamicznymi oraz niezależną regulacją mocy czynnej i biernej. W modelu tym jako regulowane zmienne stanu przyjmuje się liniową kombinację zmiennych wektorowych modelu maszyny dwustronnie zasilanej w postaci:

$$(22) \quad z_{11} = w_r, \quad (23) \quad z_{12} = \Psi_{sx} i_{ry} - \Psi_{sy} i_{rx},$$

$$(24) \quad z_{21} = \Psi_s^2, \quad (25) \quad z_{22} = \Psi_{sx} i_{rx} + \Psi_{sy} i_{ry}.$$

Wartości powyższych zmiennych nie zależą od przyjętego układu współrzędnych. Wykorzystując zależności modelu wektorowego w postaci (1)-(3) oraz zmienne multiskalarnie (22)-(25) po zastosowaniu nieliniowego odspłaszczenia jako [6]:

**VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012**

$$(26) \quad u_{r1} = \frac{1}{a_{24}} [-z_{11}(z_{22} + a_{22}z_{21}) + a_{22}u_{sf1} - u_{si1} - (a_{11} + a_{21})m_1],$$

$$(27) \quad u_{r2} = \frac{1}{a_{24}} [-a_{23}z_{21} - a_{12}i_r^2 + z_{11}z_{12} + a_{22}u_{sf2} - u_{si2} - (a_{11} + a_{21})m_2],$$

uzyskano dwa niezależne liniowe podsystemy [6]:  
- podsystem mechaniczny:

$$(28) \quad \frac{dz_{11}}{dt} = \frac{L_m}{JL_s} z_{12} - \frac{1}{J} m_o,$$

$$(29) \quad \frac{dz_{12}}{dt} = -\frac{1}{T_V} (z_{12} - m_1).$$

podsystem elektromagnetyczny:

$$(30) \quad \frac{dz_{21}}{dt} = -2\frac{R_s}{L_s} z_{21} + 2\frac{R_s L_m}{L_s} z_{22} + 2u_{sf2},$$

$$(31) \quad \frac{dz_{22}}{dt} = -\frac{1}{T_V} (z_{22} - m_2),$$

gdzie nowe zmienne sterujące oznaczono  $m_1$ ,  $m_2$ , natomiast  $T_V$  jest elektromagnetyczną stałą czasową generatora.

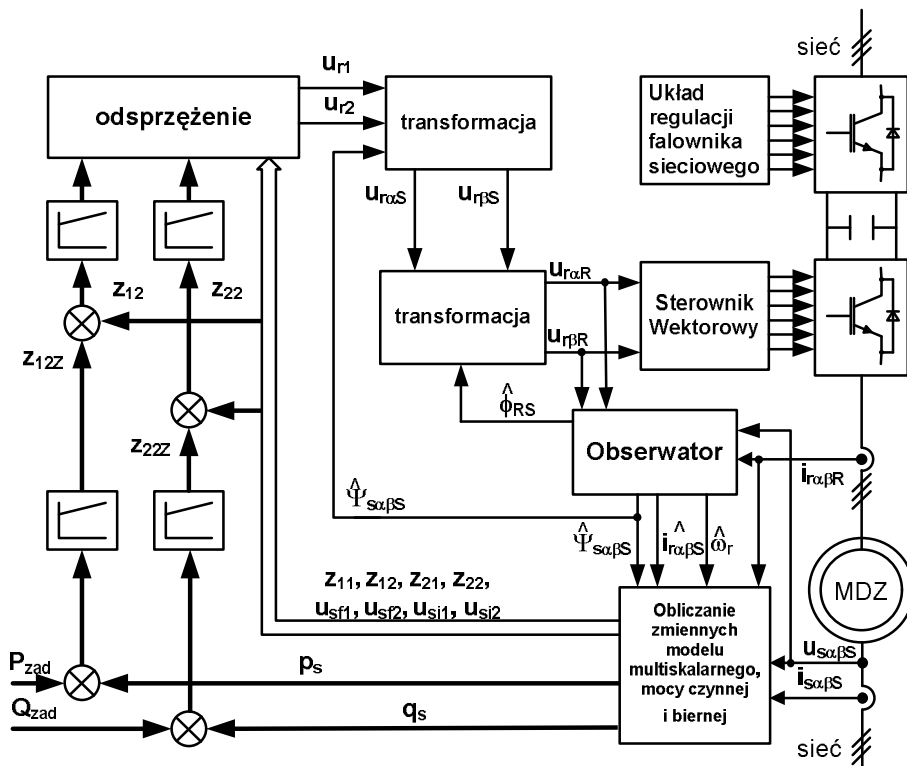
Składowe napięcia wirnika wyznaczane są z wykorzystaniem zmiennych pomocniczych  $u_{r1}$ ,  $u_{r2}$  na podstawie zależności:

$$(32) \quad u_{rx} = \frac{u_{r1}\Psi_{sy} + u_{r2}\Psi_{sx}}{z_{21}}, \quad (33) \quad u_{ry} = \frac{u_{r2}\Psi_{sy} - u_{r1}\Psi_{sx}}{z_{21}}.$$

Wartość mocy czynnej i biernej dla warunków znamionowych zasilania stojana maszyny od strony sieci w stanie ustalonym generatora można wyrazić za pomocą przyjętych zmiennych multiskalarnych następująco [6]:

$$(34) \quad P_s = -\frac{L_m}{L_s} z_{12}, \quad (35) \quad Q_s = \frac{1}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} z_{22}$$

Struktura układu regulacji oparta na modelu multiskalarnym typu „z” oraz powyższych równaniach na moc czynną i bierną w stanie ustalonym została zaprezentowana na rysunku 1. W układzie regulacji zastosowano opracowany obserwator prędkości, którego strukturę opisano powyżej.



Rys. 1. Układ regulacji mocy maszyny dwustronnie zasilanej z obserwatorem prędkości wirnika

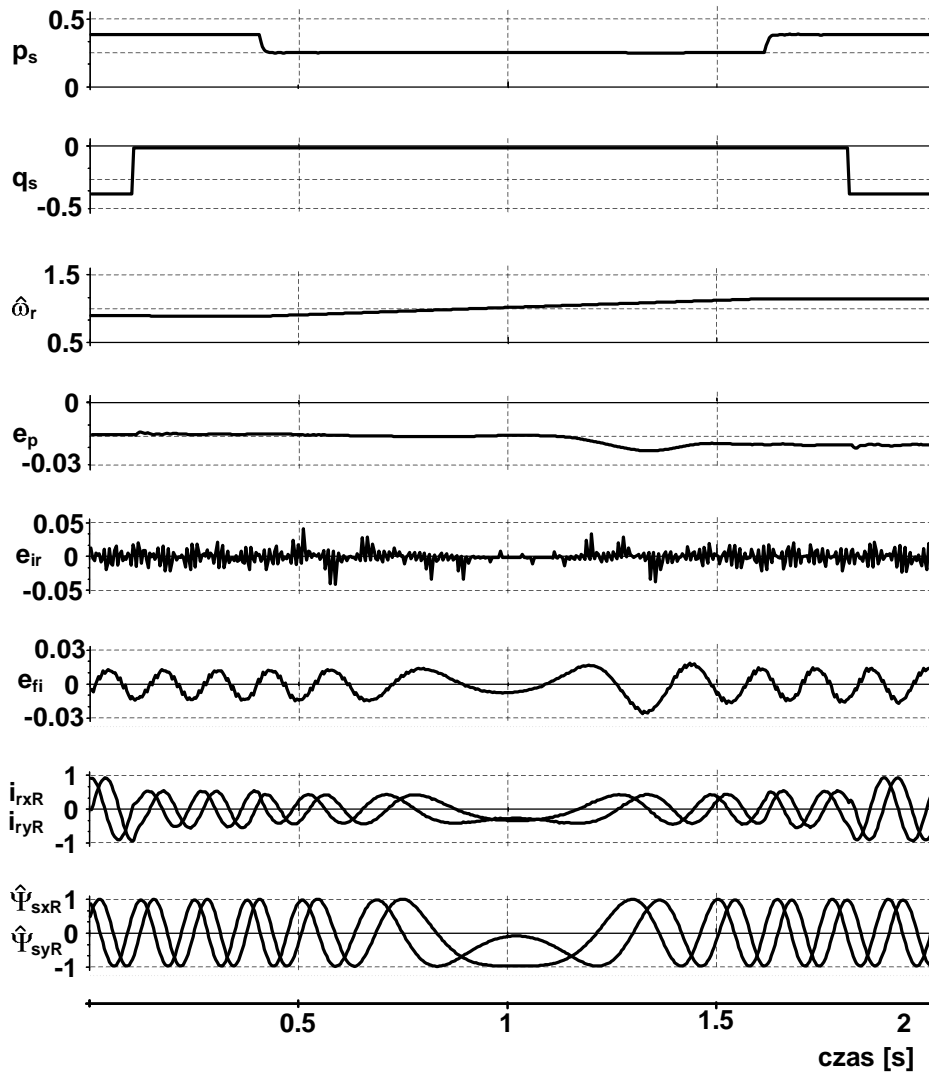
### Badania symulacyjne obserwatora prędkości

W celu weryfikacji zaproponowanej koncepcji obserwatora prędkości przeprowadzono badania symulacyjne w programie napisanym w języku C++. W programie zawarto model matematyczny maszyny indukcyjnej pierścieniowej, algorytm modulacji szerokości impulsów napięcia zasilania wirnika, strukturę układu regulacji mocy oraz strukturę obserwatora prędkości. Uwzględniono również dyskretny charakter działania układu regulacji z możliwością zmiany okresu impulsowania. Do badań symulacyjnych wykorzystano maszynę o następujących parametrach schematu zastępczego:  $R_s = 0,105$ ;  $R_r = 0,00674$ ;  $L_m = 3,150$ ;  $L_s = 3,217$ ;  $L_r = 3,236$ .

Miarą jakości działania obserwatora jest wielkość błędu odtwarzanej wielkości w stanie ustalonym oraz w stanach przejściowych wynikających ze zmiany wartości zadanych w układzie regulacji. Równania dynamiki obserwatora całkowano metodą Runge-Kutta 4 rzędu z krokiem całkowania równym okresowi impulsowania układu przekształtnika.

Na rysunku 2 pokazano działanie układu regulacji mocy czynnej i biernej MDZ z obserwatorem prędkości z rozszerzonym modelem zakłóceń. Wymuszono skoki mocy biernej zadanej w układzie regulacji z wartości  $-0,5$  j.w. do  $-0,15$  j.w. oraz skoki mocy czynnej z wartości  $0,35$  j.w. do wartości  $0,2$  j.w. odciążając generator. Skoki mocy czynnej wymusiły zmianę prędkości obrotowej wału maszyny z  $0,85$  j.w. do  $1,2$  j.w. oraz zmianę kierunków przepływu mocy w układzie generatora.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



Rys. 2. Działanie układu generatorowego z maszyną dwustronnie zasilaną i obserwatorem prędkości wirowania wału maszyny

Parametry macierzy wzmocnień obserwatora dobrano na drodze symulacji komputerowej, przyjmując następujące wartości  $k_1= 10$ ,  $k_2= 0,02$ ,  $k_3= 10$ .

Przebiegi zmiennych pokazane na rysunku 2 oznaczają kolejno:  $p_s$ ,  $q_s$  wartości chwilowe mocy czynnej i biernej po stronie stojana,  $\omega_r$  – prędkość odtworzoną w obserwatorem,  $e_p$  – błąd odtwarzania prędkości,  $e_{ir}$  – błąd odtwarzania prądu wirnika,  $e_{fi}$  – błąd odtwarzania strumienia stojana, składowe prądu wirnik oraz składowe strumienia stojana odtworzone w obserwatorem.

## Podsumowanie

W artykule pokazano układ regulacji mocy czynnej i biernej maszyny dwustronnie zasilanej z wykorzystaniem modelu multiskalarnego typu „z” oraz nowy obserwator prędkości wału maszyny. Wyniki badań symulacyjnych potwierdzają prawidłowe działanie algorytmu obserwatora. W całym przyjętym zakresie zmian prędkości obrotowej od 0,7 j.w. do 1.3 j.w. obserwator działał stabilnie. Błąd odtwarzanej prędkości  $e_p$  zarówno w stanie ustalonym jak i stanach przejściowych nie przekracza 3% wartości prędkości synchronicznej. Wpływ skokowych zmian wartości zadanych mocy dla poszczególnych torów regulacji mocy na błędy obserwatora jest mały i nie powoduje zwiększenia błędu prędkości o więcej niż 1%. Wpływ ten szczególnie widoczny jest przy dużych zmianach wartości zadanych mocy biernej. Jest to spowodowane słabo tłumionymi oscylacjami strumienia stojana. Prezentowany obserwator prędkości charakteryzują się dużą dokładnością działania, jednakże niezbędna jest weryfikacja otrzymanych wyników badań symulacyjnych na stanowisku laboratoryjnym.

## Literatura

1. Cardenas R., Ruben P., Clare J.: MRAS Observers for Sensorless Control of Doubly-Fed Induction Generator. IEEE Transactions On Power Electronics, vol. 23, no. 3, May 2008
2. Verma, V.; Maiti, S.; Chakraborty, C.: Sensorless control of grid-connected doubly-fed slip-ring induction motor drive. Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE
3. Ying L.M. Cui X., Liao Q. F.: Stator Flux Observation and Speed Estimation of a Doubly Fed Induction Generator. 2006 International Conference on Power System Technology.
4. Sheng Y.; Ajjarapu, V.; Sensorless Control of the Doubly-Fed Induction Generator for Wind Energy Generations Using a Speed-Adaptive Full-Order Flux Observer. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE
5. Krzemiński Z.: Observer of induction motor speed based on exact disturbance model. Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th
6. Krzemiński Z.: Sensorless multiscalar control of double fed machine for wind power generators. Proceedings of the Power Conversion Conference, 2002. PCC Osaka 2002.
7. Krzemiński Z.; Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2001.

---

**Autorzy:** dr inż. Krzysztof Blecharz; Katedra Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć, e-mail: [k.blecharz@ely.pg.gda.pl](mailto:k.blecharz@ely.pg.gda.pl), prof. dr hab. inż. Zbigniew Krzemiński; Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego; Wydział Elektrotechniki i Automatyki; e-mail: [z.krzeminski@ely.pg.gda.pl](mailto:z.krzeminski@ely.pg.gda.pl)  
Politechnika Gdańska ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk,