

Czesław T. Kowalski, Robert Wierzbicki
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

ZASTOSOWANIE ROZSZERZONEGO OBSERWATORA STANU I PARAMETRÓW DO WYKRYWANIA USZKODZEŃ UZWOJENIA WIRNIKA ORAZ STOJANA SILNIKA INDUKCYJNEGO

APPLICATION OF THE EXTENDED STATES AND PARAMETERS OBSERVER FOR ROTOR AND STATOR FAULT DETECTION OF THE INDUCTION MOTOR

Abstract: In this paper possibility of application the extended state observer algorithm to rotor and stator fault detection of induction motor. The induction motor condition is analyzed using estimated rotor or stator resistance. The motor mathematical model and algorithm of extended observer are presented. Rotor and stator resistance as a additional observer element are selected. The simulations showed high accuracy and fast response of extended observer algorithm. The experimental proved theoretical assumption and demonstrated extended state observer suitability to induction motor rotor and stator faults detection.

1. Wstęp

Napędy z silnikami indukcyjnymi klatkowymi są najczęściej wykorzystywane w zastosowaniach przemysłowych. Niski koszt ich produkcji oraz rozwój metod sterowania spowodował, że wyparły one silniki prądu stałego. Obecnie przyjmuje się, że 80% z wszystkich silników elektrycznych pracujących na świecie to silniki indukcyjne klatkowe. Pełnią one często bardzo ważną rolę w wielu procesach technologicznych i ich ewentualna awaria może spowodować duże straty finansowe lub nawet bardzo poważną awarię całego systemu.

Konieczność analizy aktualnego stanu technicznego silników spowodowała, że w ostatnich latach silnie rozwinęła się dziedzina naukowa zajmująca się diagnostyką uszkodzeń silników indukcyjnych. Obecnie głównym sposobem wykrywania uszkodzeń silników indukcyjnych klatkowych jest analiza częstotliwościowa sygnałów drgań mechanicznych i prądu stojana. Zazwyczaj stosuje się szybką transformatę Fouriera FFT, ale w ostatnich latach coraz częściej wykorzystuje się transformaty krótkoczasową STFT, falkową WT lub transformaty wyższych rzędów [1].

Problemy związane z monitorowaniem i diagnostyką uszkodzeń indukcyjnych napędów za pomocą klasycznych metod częstotliwościowych, wymuszają poszukiwanie nowych sposobów oceny stanu technicznego napędu. Jedną ze stosunkowo mało rozpoznanych dróg jest diagnostyka oparta na modelach matematycznych, rozwijana intensywnie w obszarze diag-

nostyki procesów przemysłowych [1], [8]. Za-
interesowanie metodami opartymi o modele matematyczne zostało zaczerpnięte z teorii sterowania silnikami indukcyjnymi [2], [3]. Rozwój energoelektroniki oraz układów mikroprocesorowych spowodował, że możliwe jest projektowanie złożonych struktur sterowania, w których są wykorzystane symulatory, obserwatory zmiennych stanu oraz parametrów. Układy te wykorzystywane są w torach sprzężeń zwrotnych w układach sterowania. Estymowane parametry często wykorzystywane są do strojenia regulatorów, przestrajania obserwatorów zmiennych stanu w celu poprawy stabilności i działania pracy napędu. Dobre efekty uzyskane z zastosowania obserwatorów w układach sterowania zachęciły do sprawdzenia ich przydatności w zagadnieniach wykrywania uszkodzeń w napędach z silnikami indukcyjnymi [4], [5], [6], [7].

W referacie przedstawiono możliwości wykorzystania rozszerzonego obserwatora stanu i parametrów w diagnostyce uszkodzeń silników indukcyjnych. Jako dodatkowe parametry wybrano rezystancję uzwojenia stojana i rezystancję uzwojenia wirnika. Założono, że uszkodzenia silnika objawiają się, jako zmiany wartości zmiennych stanu oraz parametrów silnika. Jeżeli wobec tego istnieje możliwość prowadzenia na bieżąco estymacji parametrów i zmiennych stanu silnika oraz porównywania ich z wartościami występującymi w silniku nieuszkodzonym, to uzyskane informacje o zmianach sta-

nowią dobre źródło informacji diagnostycznej. W stanie normalnej pracy silnika, estymowane parametry przyjmują wartości znamionowe zmieniające się w ograniczonym przedziale. W przypadku wystąpienia uszkodzenia analiza odchyżeń estymowanych parametrów od wartości znamionowej pozwala wykryć uszkodzenia.

Zmiany fazowych rezystancji uzwojeń wirnika i stojana w silniku indukcyjnym spowodowane uszkodzeniami (zwarcia międzyzwojowe uzwojenia stojana, pęknięcia prętów lub pierścienia zwierającego wirnika) powodują zmianę wartości parametrów schematu zastępczego. Zmiany te są znacznie większe ilościowo w porównaniu do zmian występujących w trakcie normalnej eksploatacji maszyny, np.: wzrost rezystancji w skutek nagrzewania się uzwojeń.

2. Model matematyczny silnika indukcyjnego

Model matematyczny silnika indukcyjnego, po uwzględnieniu ogólnie przyjętych założeń upraszczających można przedstawić za pomocą równań stanu, w układzie współrzędnych związanym z polem maszyny (x - y), w jednostkach względnych. Ogólnie równania zmiennych stanu i wyjścia dla modelu silnika indukcyjnego klatkowego mają następującą postać [2]:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(\omega_m(t))\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), \quad (2)$$

w których:

- wektor elektromagnetycznych zmiennych stanu:

$$\mathbf{x}(t) = [i_{sx} \quad i_{sy} \quad \psi_{rx} \quad \psi_{ry}]^T, \quad (3)$$

- wektor wyjścia:

$$\mathbf{y}(t) = [i_{sx} \quad i_{sy}]^T, \quad (4)$$

- wektor wejścia (sterowania):

$$\mathbf{u}(t) = [u_{sx} \quad u_{sy}]^T, \quad (5)$$

oraz odpowiednio:

- macierz wyjścia:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

- macierz wejścia:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\Omega_b}{\sigma \cdot x_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Omega_b}{\sigma \cdot x_s} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

macierz stanu:

$$\mathbf{A}(\omega_m) = \begin{bmatrix} a & \omega_e & b & c \\ -\omega_e & a & -c & b \\ d & 0 & -e & -\omega_s \Omega_b \\ 0 & d & \omega_s \Omega_b & -e \end{bmatrix}, \quad (8)$$

gdzie:

$$a = -\frac{1}{x_s \sigma} r_s \Omega_b - \frac{1-\sigma}{x_r \sigma} r_r \Omega_b, b = \frac{k_r r_r \Omega_b}{x_r x_s \sigma}, c = \frac{\omega_m k_r \Omega_b}{x_s \sigma},$$

$$d = \frac{x_M}{x_r} r_r \Omega_b, e = \frac{r_r \Omega_b}{x_r}, k_r = \frac{x_M}{x_r},$$

u_{sx}, u_{sy} - napięcie stojana w osiach (x - y),

i_{sx}, i_{sy} - prąd stojana w osiach (x - y),

ψ_{rx}, ψ_{ry} - strumień wirnika w osiach (x - y),

r_s, r_r - rezystancja uzwojenia stojana i wirnika;

x_s, x_r - reaktancja uzwojenia stojana i wirnika,

x_M - reaktancja główna,

σ - współczynnik całkowitego rozproszenia maszyny,

ω_m - prędkość kątowna wirnika,

ω_e - pulsacja napięcia zasilającego stojan,

ω_s - pulsacja poślizgu,

Ω_b - pulsacja odniesienia (bazowa).

3. Niestacjonarny rozszerzony obserwator stanu i parametrów

W przeprowadzonych badaniach jako dodatkowy element wektora stanu przyjęto rezystancję uzwojenia stojana lub rezystancję uzwojenia wirnika. Rozszerzone wektory stanu dla silnika indukcyjnego przedstawiono poniżej:

$$\mathbf{x}_{R1} = [i_{sx} \quad i_{sy} \quad \psi_{rx} \quad \psi_{ry} \quad r_s]^T \quad (9)$$

lub

$$\mathbf{x}_{R2} = [i_{sx} \quad i_{sy} \quad \psi_{rx} \quad \psi_{ry} \quad r_r]^T \quad (10)$$

Zgodnie z teorią przedstawioną w [2], [3] dla modelu silnika indukcyjnego, niestacjonarny rozszerzony obserwator składa się z dwóch podukładów:

- obserwatora zredukowanego rzędu:

$$\dot{\mathbf{z}}_{n-m} = \mathbf{F}_1 \mathbf{z}_{n-m} + \mathbf{K}_1 \mathbf{C} \mathbf{x}_n + \mathbf{T}_{11} \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{T}_{11} \mathbf{g}_n(\xi) \quad (11)$$

- identyfikatora parametrów:

$$\dot{\mathbf{z}}_p = \mathbf{F}_2 \mathbf{z}_p + \mathbf{K}_2 \mathbf{C} \mathbf{x}_n + \mathbf{T}_{21} \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{T}_{21} \mathbf{g}_n(\xi) \quad (12)$$

gdzie:

$$\mathbf{g}_n(\xi) = -\frac{\partial(\mathbf{Ax})}{\partial \mathbf{x}_p} \xi_p \quad (13)$$

ξ_p - estymata wektora parametrów w danym kroku obliczeniowym,

$\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ - macierz stanu obserwatora, identyfikatora,

$\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ - macierz wagowa obserwatora, identyfikatora,

$\mathbf{T}_{11}, \mathbf{T}_{21}$ - macierz transformacji wektora stanu podukładów obserwatora i identyfikatora,

m - wymiar wektora wyjścia obiektu,

n - wymiar wektora stanu obiektu,

p - wymiar wektora parametrów.

Zależności określające estymatę wektora stanu i parametru można przedstawić następująco:

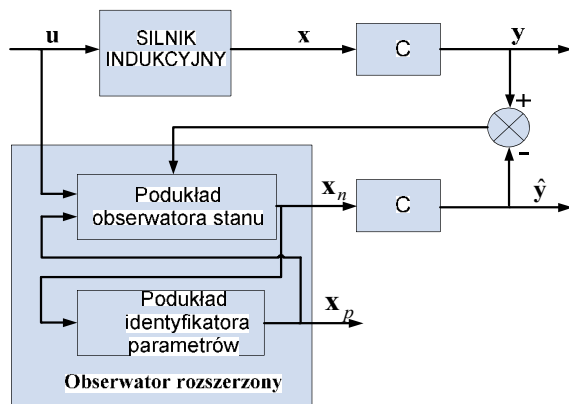
$$\hat{\mathbf{x}}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{T}_{11} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{z}_{n-m} - \mathbf{T}_{12} \cdot \hat{\mathbf{x}}_p \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_p = (\mathbf{T}_{21} \cdot \mathbf{A}_2)^{-1} \cdot \mathbf{F}_2 \cdot (\mathbf{z}_p - \mathbf{T}_{21} \cdot \hat{\mathbf{x}}_n) \quad (15)$$

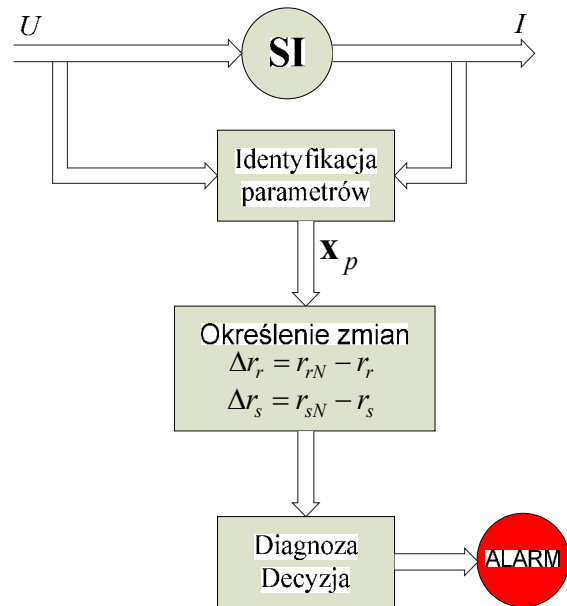
gdzie: $\mathbf{A}_2 = \frac{\partial(\mathbf{Ax})}{\partial \mathbf{x}_p}$.

Elementy poszczególnych macierzy obserwatora dobierane są zgodnie z zasadami syntezy rozszerzonych niestacjonarnych obserwatorów stanu i parametrów silnika indukcyjnego opisanych w [2], [3].

Schemat blokowy niestacjonarnego rozszerzonego obserwatora stanu dla silnika indukcyjnego przedstawiono na rysunku 1, a na rysunku 2 przedstawiono idę zastosowania obserwatora w diagnostyce uszkodzeń stojana i wirnika silnika indukcyjnego.



Rys. 1. Schemat blokowy układu niestacjonarnego rozszerzonego obserwatora stanu i parametrów

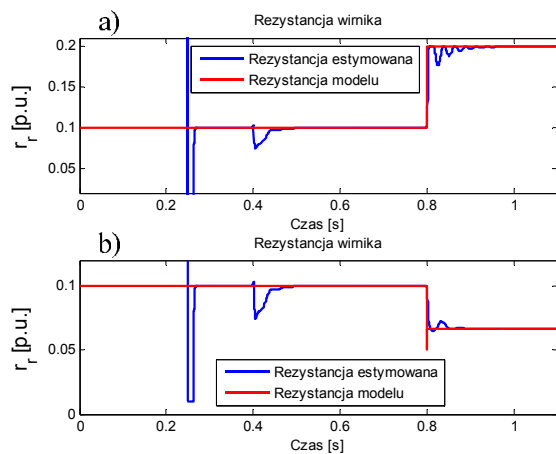


Rys. 2. Schemat ideowy zastosowania rozszerzonego obserwatora w diagnostyce silników indukcyjnych

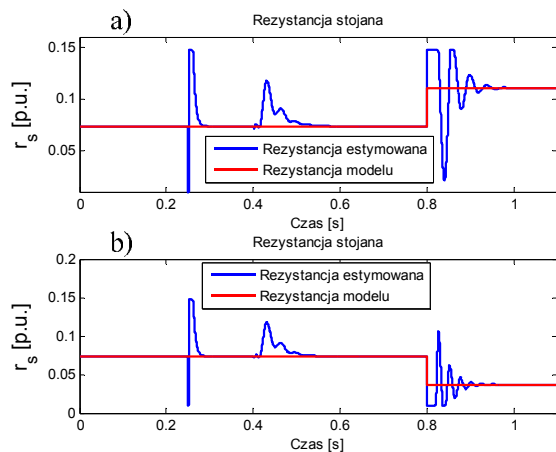
4. Wyniki badań symulacyjnych niestacjonarnego rozszerzonego obserwatora stanu

W celu sprawdzenia założeń teoretycznych i możliwości zastosowania algorytmu rozszerzonego obserwatora stanu do wykrywania uszkodzeń uzwojenia stojana oraz uzwojenia wirnika silnika indukcyjnego, przeprowadzono symulację pracy silnika wraz z estymatorem parametrów. Opracowany model składa się z dwuosioowego modelu silnika indukcyjnego Sh 90I4 o mocy 1,5 [kW], zasilanego z sieci. Znamionowe wartości rezystancji uzwojeń wirnika oraz stojana wynoszą odpowiednio: $r_{r1} = 0,1$ [p.u.] oraz $r_{s1} = 0,077$ [p.u.]. Na rysunku 3 przedstawiono estymowaną i rzeczywistą rezystancję uzwojenia wirnika, a na rysunku 4 rezystancję uzwojenia stojana dla zmian tych parametrów. Algorytm rozszerzonego obserwatora stanu uruchamiany jest w czasie $t_2 = 0,25$ s. W chwili $t_1 = 0,4$ s następuje skokowe załączenie znamionowego momentu obciążenia. Na rysunku 3a rezystancja uzwojenia wirnika w chwili $t_2 = 0,8$ s zwiększana jest o 50%, natomiast na rysunku 3b rezystancja uzwojenia wirnika zmniejszana jest o 50%.

Na rysunku 4a rezystancja uzwojenia stojana w chwili $t_2 = 0,8$ s zwiększana jest o 50%, natomiast na rysunku 4b rezystancja uzwojenia stojana zmniejszana jest o 50%.



Rys. 3. Przebiegi estymowanej i rzeczywistej rezystancji uzwojenia wirnika silnika Sh 90I4



Rys. 4. Przebiegi estymowanej i rzeczywistej rezystancji uzwojenia stojana silnika Sh 90I4

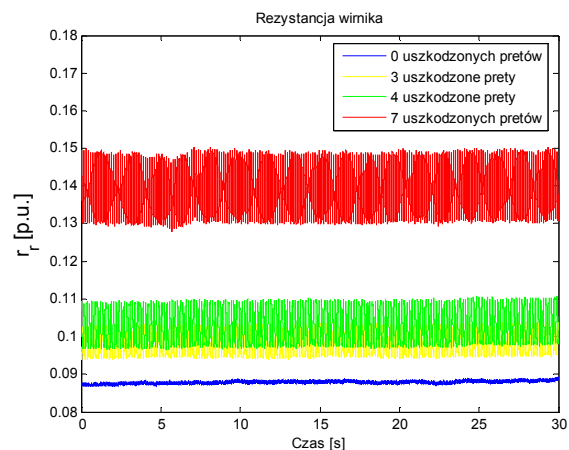
Pozwala to stwierdzić, że zastosowanie rozszerzonego obserwatora stanu stwarza pewną alternatywę dla tradycyjnych bezpośrednich metod detekcji uszkodzeń silników opartych na analizie widmowej prądu stojana i drgań mechanicznych.

Na podstawie analizy zmian parametrów modelu dwuosowego można wnioskować o uszkodzeniu uzwojenia wirnika oraz uzwojenia stojana. Pęknięcie prętów klatki wirnika powoduje zmianę estymowanej rezystancji wirnika, natomiast zwarcie poszczególnych zwojów uzwojenia stojana przejawia się zmianą estymowanej rezystancji uzwojenia stojana. Analiza zmian estymowanego parametru modelu dwuosowego silnika może być podstawą do realizacji układu diagnostycznego do śledzenia na bieżąco stanu technicznego wirnika oraz stojana silnika indukcyjnego (rys. 2).

5. Wyniki badań eksperymentalnych obserwatora stanu i parametrów w zastosowaniu do diagnostyki silników indukcyjnych

Badania eksperymentalne przeprowadzono dla silnika Sh 90I4, podobnie jak przedstawione wcześniej badania symulacyjne. Do realizacji obserwatora wykorzystano kontroler DSP firmy dSpace 1104. Krok całkowania numerycznego wynosił $dt = 80 \mu s$. Przedstawione poniżej wyniki estymacji rezystancji uzwojenia wirnika oraz rezystancji stojana zostały wykonane przy znamionowym obciążeniu maszyny i założeniu zerowych wartości początkowych. Dla porównania skuteczności detekcji uszkodzeń przebadano cztery przypadki uszkodzeń wirnika oraz stojana.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki estymacji rezystancji uzwojenia wirnika dla wirnika „zdrowego” oraz z 3, 4, 7 uszkodzonymi prętami.



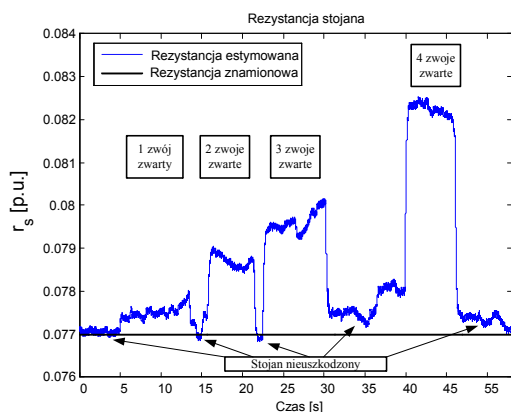
Rys. 5. Przebiegi estymowanej rezystancji uzwojenia wirnika dla różnych uszkodzeń prętów klatki wirnika i przy ich braku dla silnika Sh 90I4

Przeprowadzone badania eksperymentalne zastosowania rozszerzonego obserwatora stanu do diagnostyki wirnika silnika indukcyjnego zasilanego z sieci potwierdziły założenia teoretyczne. Przerwanie prętów klatki wirnika powoduje istotny wzrost estymowanej rezystancji wirnika. Można zauważyć, że wystąpienie uszkodzenia nie tylko powoduje wzrost estymowanej wartości rezystancji uzwojenia wirnika, ale dodatkowo pojawiają się oscylacje estymowanej wartości, co także można uznać za symptom wystąpienia uszkodzenia.

W celu określenia skuteczności detekcji uszkodzenia stojana przebadano 5 przypadków: sto-

jan nieuszkodzony oraz zwarte od 1 do 4 zwojów. Zwarcie większej ilości zwojów nie było możliwe z powodu zbyt dużego prądu płynącego w obwodzie zwarciovym.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki estymacji rezystancji uzwojenia stojana silnika Sh 9014 dla opisanych przypadków.



Rys. 6. Przebiegi estymowanej rezystancji uzwojenia stojana dla różnych stopni uszkodzenia uzwojenia stojana silnika Sh 9014

Przeprowadzone badania eksperymentalne z wykorzystaniem rozszerzonego obserwatora stanu do diagnostyki stojana silnika indukcyjnego zasilanego z sieci, potwierdziły założenia teoretyczne. Wystąpienie zwarcia międzyzwojowych w uzwojeniu stojana powoduje wzrost estymowanej rezystancji stojana.

Wykrycie jednego zwartego zwoju jest bardzo trudne i może być mylone z brakiem uszkodzenia, jednak zwarcie dwóch i więcej zwojów powoduje znaczny wzrost estymowanej rezystancji uzwojenia stojana (2 zwarte zwoje – wzrost o około 2,5%, 3 zwarte zwoje – wzrost o około 3,2%, 4 zwarte zwoje – wzrost o około 6,1% w odniesieniu do znamionowej rezystancji uzwojenia stojana).

Na podstawie zmian estymowanych parametrów można wnioskować o uszkodzeniu uzwojenia wirnika i stojana silnika indukcyjnego.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania symulacyjne oraz eksperymentalne z zastosowania rozszerzonego obserwatora stanu i parametrów do monitorowania stanu technicznego silnika indukcyjnego klatkowego, potwierdziły skuteczność tego typu algorytmów we wczesnym wykrywaniu uszkodzeń stojana i wirnika. Obserwator wykazuje wrażliwość na zmianę parametrów, a czas odpowiedzi jest na poziomie pojedynczych mili-

sekund. Ma to bardzo duże znaczenie w przypadku diagnostyki stojana, gdzie zwarcia międzyzwojowe mogą powiększać się lawinowo i jedynym sposobem na uniknięcie dużych strat jest szybka reakcja układu diagnostycznego. Dalsze prace autorów będą obejmowały diagnostykę przekształtnikowych układów napędowych, gdzie zmiana częstotliwości zasilania oraz praca w zamkniętym układzie sterowania wprowadza dodatkowe problemy.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt badawczy rozwojowy Nr R01 014 03.

7. Literatura

- [1] Kowalski Cz. T.: *Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych PWR, nr 57, seria Monografie nr 18, 2005
- [2] Orłowska-Kowalska T.: *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003
- [3] Orłowska-Kowalska T.: *Application of extended Luenberger observer for flux and rotor time-constant estimation in induction motor drives*. IEE Proceedings, Pt. D, vol. 136, no. 6, 1989, pp. 324-330
- [4] Kowalski Cz.T., Wierzbicki R.: *Zastosowanie rozszerzonego filtru Kalmana do wykrywania uszkodzeń stojana i wirnika silnika indukcyjnego*. XLIII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Poznań 2007, ss. 69-73
- [5] Kallesoe C.S., Vadstrup P., Rasmussen H., Izadi-Zamanabadi R.: *Observer-Based Estimation of Stator-Winding Faults in Delta-Connected Induction Motors: A Linear Matrix Inequality approach*. IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 43, no. 4, August 2007
- [6] Kallesoe C.S.: *Model-based Stator Fault Detection in Induction Motors*. Industry Applications Society Annual Meeting, 2008, IAS '08
- [7] Bachir S., Tnani S., Trigeassou J., Champenois G.: *Diagnosis by Parameter Estimation of Stator and Rotor Faults Occurring in Induction Machines*, IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 53, no. 3, June 2006, pp. 963-973
- [8] Korbicz J. i inni.: *Diagnostyka procesów. Modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania*. WNT Warszawa, 2002

Autorzy

Dr hab. inż. Czesław T. Kowalski, prof. PWR,
e-mail: czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl
Mgr inż. Robert Wierzbicki,
e-mail: robert.wierzbicki@pwr.wroc.pl
Politechnika Wrocławska; Instytut Maszyn,
Napędów i Pomiarów Elektrycznych,
ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław