

Szymon Bednarz
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

WYKRYWANIE USZKODZENIA WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO Z WYKORZYSTANIEM ADAPTACYJNEGO ESTYMATORA REZYSTANCJI

DETECTION OF THE INDUCTION MOTOR ROTOR FAULT USING ADAPTIVE PARAMETER ESTIMATOR

Streszczenie: W artykule omówiono możliwość wykrywania uszkodzenia prętów klatki wirnika silnika indukcyjnego z wykorzystaniem metody opartej na identyfikacji parametrów. Technika ta bazuje na założeniu, że wybrane uszkodzenia mogą objawiać się zmianami parametrów silnika, a ich estymacja i obserwowanie tych zmian pozwala na wczesną identyfikację uszkodzenia. Przy czym, w przypadku pęknięcia prętów klatki wirnika, objawem może być wzrost rezystancji schematu zastępczego wirnika. W zaproponowanym podejściu do estymacji rezystancji wirnika wykorzystano układu adaptacyjny z modelem odniesienia (MRAS). Badania silnika indukcyjnego przeprowadzono w bezpośredniej polowo-zorientowanej strukturze sterowania wektorowego. W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, które wykonano w środowisku MATLAB/Simulink.

Abstract: This paper deals with the broken rotor bars detection in squirrel-cage induction motor using parameter identification approach. This technique is based on the assumption, that the chosen failures may result in motor parameters variations. Estimation and observation of parameters changes allows to incipient fault detection. In the case of broken rotor bars, increase of the rotor resistance value may be a good fault symptom. In the proposed system, the rotor resistance estimator is based on the model reference adaptive system (MRAS). The induction motor is operating in the direct field-oriented control structure, under different conditions. Simulation results are performed in MATLAB/Simulink software.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, uszkodzenie wirnika, estymator rezystancji wirnika, MRAS, DFOC
Keywords: induction motor, rotor fault, rotor resistance estimator, MRAS, DFOC

1. Wstęp

Silniki indukcyjne (SI) mają szerokie zastosowanie w wielu aplikacjach przemysłowych, często stanowiąc kluczowe role w procesach technologicznych [9]. Podczas pracy, w silniku indukcyjnym – tak jak w każdym innym urządzeniu – mogą wystąpić uszkodzenia, takie jak: zwarcia w uzwojeniu stojana, zniszczenie łożysk oraz pęknięte pręty i pierścienie zwierające w klatce wirnika [4], [6], [12]. Każde z wyżej wymienionych uszkodzeń powinno być wykryte w możliwie jak najkrótszym czasie, co pozwala uniknąć dalszej degradacji maszyny lub innych współpracujących z nią podzespołów, dzięki czemu można ograniczyć straty finansowe oraz zwiększyć poziom bezpieczeństwa obsługi danego procesu. Wczesne wykrywanie uszkodzeń silników indukcyjnych stanowi pole badań dla wielu krajowych [5-6], [10-13] oraz zagranicznych [1], [3-4], [7] ośrodków naukowych.

Uszkodzenia wirnika stanowią około 10% wszystkich uszkodzeń występujących w silnikach indukcyjnych [4], [6], [12], jednak ich wczesne wykrywanie stanowi ważne zagadnienie, dlatego obecnie stosuje się wiele metod pozwalających skutecznie realizować to zadanie. Metody te oparte są na analizie widmowej prądów fazowych stojana z wykorzystaniem Szybkiej Transformaty Fouriera (FFT) lub detektorów neuronowych i opartych na logice rozmytej [4], [6].

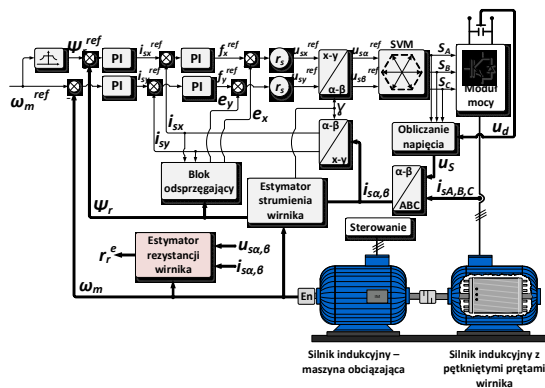
Kolejne podejście, po raz pierwszy zaproponowane w [3], bazuje na założeniu, że uszkodzenia mogą objawiać się zmianami parametrów silnika indukcyjnego, przy czym degradacja pręta klatki może skutkować wzrostem rezystancji zastępczej wirnika. Zastosowanie tej techniki do identyfikacji uszkodzeń wymaga zastosowania estymatorów parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego. W literaturze można spotkać się z zastosowaniem al-

gorytmów off-line bazujących na Metodzie Najmniejszych Kwadratów [3] lub programowaniu nieliniowym [1], oraz estymatorów on-line opartych na Rozszerzonym Filtrze Kalmana [7], [13] lub Rozszerzonym Obserwatorze Luenbergera [5].

W niniejszym artykule przedstawiono zastosowanie adaptacyjnego estymatora rezystancji wirnika typu MRAS (ang. Model Reference Adaptive System) do wykrywania pękniętych prętów klatki wirnika silnika indukcyjnego, który w pracy [2] został wykorzystany do kompensacji uszkodzenia wirnika w beczujnikowym układzie napędowym. W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, które zrealizowano w środowisku MATLAB/Simulink.

2. Struktura sterowania wektorowego silnika indukcyjnego z dodatkowym estymatorem rezystancji wirnika

Silnik indukcyjny z uszkodzonymi prętami klatki wirnika badany był w wektorowej połowozorientowanej strukturze sterowania DFOC (ang. Direct Field-Oriented Control), której schemat blokowy przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Bezpośrednia połowozorientowana, wektorowa struktura sterowania dla silnika indukcyjnego

Idea działania zastosowanej metody sterowania wektorowego została szczegółowo omówiona w [8] i [14]. Do prawidłowej pracy układu sterowania konieczna jest między innymi informacja o aktualnym położeniu i module wektora strumienia skojarzonego wirnika, który jest trudnierzalną zmienną stanu silnika indukcyjnego. Z tego powodu, do jego odtwarzania wykorzystuje się estymatory [8]. Jednym z nich może być estymator, nazywany symulatorem lub modelem prądowym, którego model mate-

matyczny bazuje na równaniu różniczkowym obwodu wirnika silnika indukcyjnego [8], wyrażonym w jednostkach względnych [p.u.]:

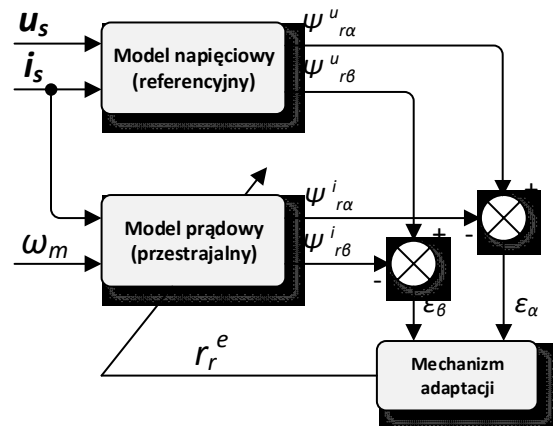
$$\frac{d}{dt}\Psi_r = \frac{1}{T_N} \left(\frac{T_r}{x_r} (x_m i_s - \Psi_r) + j\omega_m \Psi_r \right), \quad (1)$$

gdzie:

Ψ_r – estymowany wektor strumienia skojarzonego wirnika, i_s – wektor prądu stojana, ω_m – prędkość kątowna wirnika, T_r, x_r, x_m – rezystancja i reaktancja zastępcza wirnika, reaktancja magnesująca, $T_N = 1/2\pi f_{sN}$.

Dodatkowo, w przypadku zasilania silnika indukcyjnego z falownika napięcia, konieczne jest zastosowanie specjalnego bloku, który wyznacza sygnały odprężające e_x i e_y [8].

Omówiony układ sterowania został rozszerzony o dodatkowy estymator rezystancji wirnika, który pracuje równolegle, w otwartej pętli i wykorzystany jest do detekcji uszkodzenia wirnika. Estymator ten zaproponowany w [15], bazuje na technice MRAS, czyli jest to układ adaptacyjny z modelem odniesienia. Schemat blokowy estymatora przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Struktura estymatora rezystancji wirnika [15]

W układzie tym jako model odniesienia wykorzystywany jest tzw. symulator napięciowy strumienia wirnika, który charakteryzuje się niezależnością od rezystancji wirnika [8], [15]. Natomiast modelem przestrajalnym jest symulator prądowy, który jawnie zależy od wartości tego parametru. Idea działania estymatora opiera się na minimalizacji błędów ε_α , ε_β wynikających z różnicy estymacji składowych strumienia między symulatorami:

$$\{\varepsilon_\alpha = \psi_{r\alpha}^u - \psi_{r\alpha}^i, \varepsilon_\beta = \psi_{r\beta}^u - \psi_{r\beta}^i\} \quad (2)$$

gdzie:

indeksy u, i wskazują na wykorzystanie symulatora napięciowego i prądowego do odtwarzania strumienia wirnika.

Błędy te są wykorzystywane w algorytmie adaptacji rezystancji wirnika:

$$r_r^e = \int A_1 dt + A_2, \quad (3)$$

gdzie:

$$\begin{cases} A_1 = K_1 \left[\left(\frac{-\psi_{r\alpha}^i + x_{\alpha} i_{\alpha}}{x_r} \right) \varepsilon_\alpha + \left(\frac{-\psi_{r\beta}^i + x_{\beta} i_{\beta}}{x_r} \right) \varepsilon_\beta \right] \\ A_2 = K_2 \left[\left(\frac{-\psi_{r\alpha}^i + x_{\alpha} i_{\alpha}}{x_r} \right) \varepsilon_\alpha + \left(\frac{-\psi_{r\beta}^i + x_{\beta} i_{\beta}}{x_r} \right) \varepsilon_\beta \right] \end{cases} \quad (4)$$

Parametry K_1, K_2 stanowią stałe, dodatnie współczynniki. Istotną cechą estymatora jest to, że działa on poprawnie tylko w przypadku wystąpienia momentu obciążenia.

3. Analiza wykorzystania adaptacyjnego estymatora rezystancji do wykrywania uszkodzenia wirnika w strukturze sterowania DFOC

Do badań symulacyjnych wykorzystano obwodowy model matematyczny silnika indukcyjnego z uszkodzonymi prętami klatki wirnika, który został szczegółowo omówiony w [11]. W modelu tym, uszkodzenie pręta powoduje wzrost wartości rezystancji wirnika, która dodatkowo oscyluje, ponieważ zależna jest od aktualnej wartości kąta położenia wirnika.

W trakcie badań modelowano całkowite pęknięcie sąsiadujących prętów, a ilość oraz chwilę ich uszkodzeń oznaczono strzałkami i cyframi. Badany silnik indukcyjny posiadał 22 pręty w klatce (pozostałe dane oraz parametry silnika wykorzystane w symulacjach zamieszczono w tabelach 1 i 2).

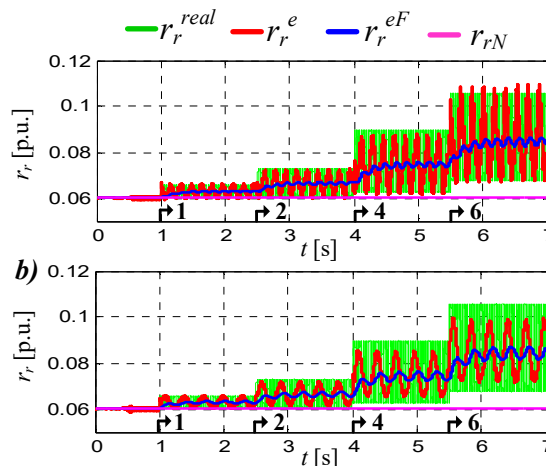
Tab. 1. Dane znamionowe silnika indukcyjnego

Wielkość	P_N [kW]	U_N [V]	I_N [A]	n_N [rpm]	f_N [Hz]	p_b [Hz]
Wartość	1,1	220/380	5,0/2,9	1400	50	2

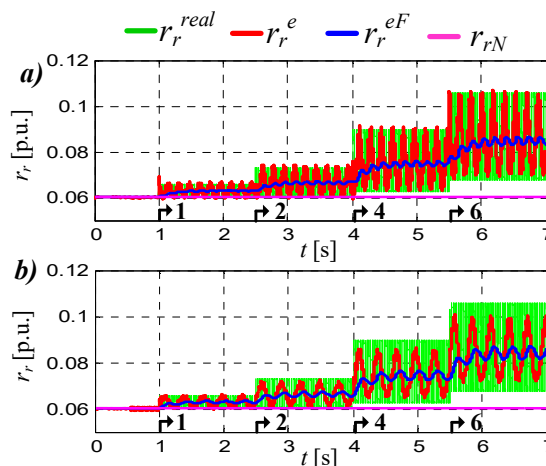
Tab. 2. Parametry silnika indukcyjnego

Wielkość	R_s	R_r	X_s	X_r	X_m
Wartość [Ω]	5,9	4,6	131,1	131,1	123,3
Wartość [p.u.]	0,0778	0,0601	1,7281	1,7281	1,6253

Na rysunku 3 i 4 przedstawiono przebiegi rzeczywistej r_r^{real} (otrzymanej z modelu uszkodzonego silnika), estymowanej r_r^e oraz znamionowej r_{rN} wartości rezystancji wirnika podczas uszkodzenia, dla prędkości zadanych $\omega_m = \omega_{mN}$ i $\omega_m = 0,5\omega_{mN}$ oraz różnych wartości momentu obciążenia. Biorąc pod uwagę fakt, że wartość estymowanej rezystancji charakteryzuje się dużymi oscylacjami, zastosowano filtr dolno-przepustowy, a wartość ta została przedstawiona jako r_r^{eF} (gdzie indeks F wskazuje na wartość filtrowaną).



Rys. 3. Przebiegi rzeczywistej, estymowanej oraz znamionowej rezystancji wirnika podczas uszkodzenia prętów dla $\omega_m = \omega_{mN}$ oraz $m_o = m_N$ (a) i $m_o = 0,5m_N$ (b)

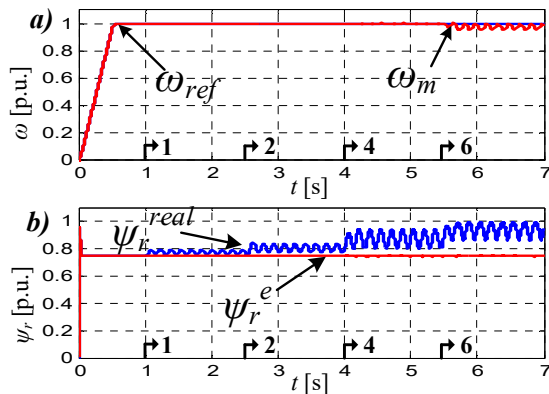


Rys. 4. Przebiegi rzeczywistej, estymowanej oraz znamionowej rezystancji wirnika podczas uszkodzenia prętów dla $\omega_m = 0,5\omega_{mN}$ oraz $m_o = m_N$ (a) i $m_o = 0,5m_N$ (b)

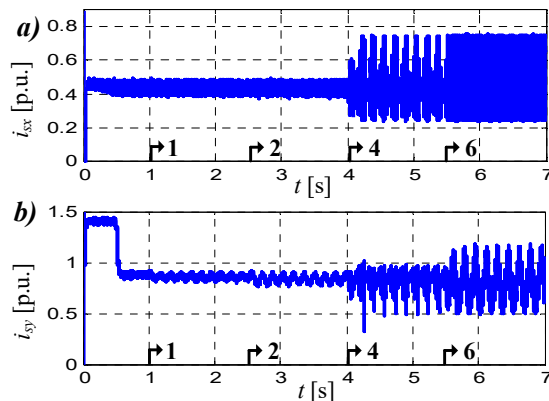
Analizując otrzymane wyniki, wyraźnie widać, że estymowana wartość rezystancji wirnika wzrasta wraz z liczbą uszkodzonych prętów,

zarówno dla znamionowego jak i mniejszego momentu obciążenia. Można również zauważyć, że podobne wyniki otrzymano dla prędkości $\omega_m = 0,5\omega_{mN}$, przez co można założyć, że filtrowana wartość rezystancji jest w pewnym stopniu odporna na zmiany prędkości zadanej oraz momentu obciążenia (dla $m_o \neq 0$).

Dodatkowo, na rysunkach 5-8 przedstawiono przebiegi wybranych zmiennych stanu silnika indukcyjnego podczas uszkodzenia prętów wirnika.



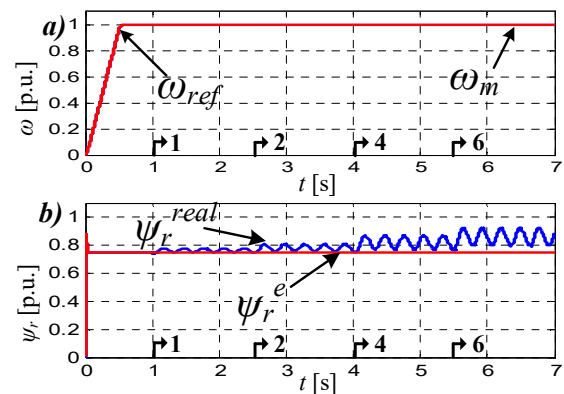
Rys. 5. Przebiegi zadanej, mierzonej prędkości kątowej wirnika (a) oraz rzeczywistego, estymowanego strumienia wirnika (b) podczas uszkodzenia prętów wirnika dla $\omega_m = \omega_{mN}$, $m_o = m_N$



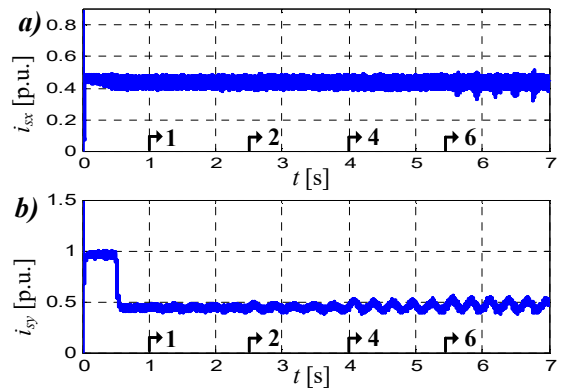
Rys. 6. Przebiegi składowych polowych prądu stojana i_{sx} (a) i i_{sy} (b) podczas uszkodzenia wirnika dla $\omega_m = \omega_{mN}$, $m_o = m_N$

Analizując otrzymane przebiegi, wyraźnie widać, że zmienne stanu charakteryzują się oscylacjami, których intensywność zależy od liczby uszkodzonych prętów oraz momentu obciążenia. Kolejnym ważnym zjawiskiem jakie można zaobserwować, jest błąd estymacji strumienia wirnika, który wynika z jawnej za-

ležności modelu matematycznego symulatora prądowego (1) od rezystancji wirnika. W estymatorze tym, wartość tego parametru jest stała, ponieważ estymator rezystancji pracuje w otwartej pętli, a estymowana rezystancja wirnika - pomimo zmian w skutek uszkodzenia - nie jest na bieżąco aktualizowana w układzie sterowania. Powoduje to, że układ regulacji nie stabilizuje rzeczywistego strumienia wirnika na wartości zadanej, przez co nie zapewnia podstawowego warunku do poprawnej realizacji sterowania polowo-zorientowanego.



Rys. 7. Przebiegi rzeczywistej, estymowanej oraz znamionowej rezystancji wirnika podczas uszkodzenia prętów dla $m_o = m_N$ (a) i $m_o = 0,5m_N$ (b), $\omega_m = 0,5\omega_{mN}$



Rys. 8. Przebiegi rzeczywistej, estymowanej oraz znamionowej rezystancji wirnika podczas uszkodzenia prętów dla $m_o = m_N$ (a) i $m_o = 0,5m_N$ (b), $\omega_m = 0,5\omega_{mN}$

4. Podsumowanie

Podsumowując przedstawione wyniki badań, można potwierdzić założenie, że rezystancja wirnika może być dobrym sygnałem diagnostycznym do wczesnego wykrywania uszkodzenia prętów klatki silnika indukcyjnego. Jednak, warto podkreślić, że zmiany rezystancji mogą zachodzić również na skutek nagrzewania

się uzwojeń podczas pracy, lecz charakter tych zmian jest o wiele wolniejszy niż w przypadku wystąpienia pęknięcia pręta (skokowa zmiana rezystancji).

Struktura przedstawionego estymatora adaptacyjnego bazuje na prostych, dobrze znanych symulatorach strumienia wirnika, dzięki czemu jego implementacja stosunkowo łatwa w realizacji, co jest zaletą w stosunku do Filtru Kalmana.

Zmiany rezystancji wirnika na skutek uszkodzenia prętów klatki negatywnie wpływają na działanie układu napędowego, dlatego wydaje się uzasadnione kompensowanie tych zjawisk poprzez wprowadzenie estymowanej rezystancji do układu sterowania.

5. Literatura

- [1]. S. Bachir, S. Tnani, J.C. Trigeassou, G. Champenois, "Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, nr 3, str. 963-973, 2006.
- [2]. Sz. Bednarz, "Rotor fault compensation and detection in the sensorless induction motor drive", *Power Electronics and Drives*, nr 2, str. 71-80, 2017.
- [3]. K. R. Cho, J.H. Lang, S.D. Umans, "Detection of broken bars in induction motor using state and parameter estimation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, nr 3, str. 702-709, 1992.
- [4]. F. Filipetti, A. Bellini, G.A. Capolino, "Condition monitoring and diagnosis of rotor faults in induction machines: state of art and future perspectives", *IEEE Workshop on Electrical Machines Design Control and Diagnosis (WEMDCD)*, Paris, 2013.
- [5]. Cz. T. Kowalski, R. Wierzbicki, "Zastosowanie rozszerzonego obserwatora stanu i parametrów do wykrywania uszkodzeń uzwojenia wirnika oraz stojana silnika indukcyjnego", *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 84, str. 65-69, 2009.
- [6]. Cz. T. Kowalski, "Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji", *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2013.
- [7]. M. S. Nait Said, M. Benbouzid, A. Benchaib, "Detection of broken bars in induction motor using an Extended Kalman Filter for rotor resistance sensorless estimation", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, nr 1, str. 66-70, 2000.
- [8]. T. Orłowska-Kowalska, "Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi", *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2003.
- [9]. T. Orłowska-Kowalska, M. Dybkowski, "Industrial drive systems. Current state and development trends", *Power Electronics and Drives*, nr 1, str. 5-25, 2016.
- [10]. T. Orłowska-Kowalska, Cz. T. Kowalski, M. Dybkowski, "Rotor fault analysis in the sensorless field oriented controlled induction motor drive", *Automatika*, nr 2, str. 149-156, 2010.
- [11]. M. Pawlak, T. Orłowska-Kowalska, "Zastosowanie uproszczonego modelu dwuosiowego do modelowania uszkodzeń wirnika silnika klatkowego", *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, str. 48-53, 2006.
- [12]. S. Szymaniec, "Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi", *Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej*, Opole 2013.
- [13]. R. Wierzbicki, Cz. T. Kowalski, "Wykrywanie uszkodzeń uzwojenia wirnika przekształtnikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym", *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 87, str. 179-184, 2010.
- [14]. K. Zawirski, J. Deskur, J. Kaczmarek, "Automatyka napędu elektrycznego", *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej*, Poznań, 2012.
- [15]. Y. Agrebi Zorgani, Y. Koubaa, M. Boussak, "Simultaneous estimation of speed and rotor resistance in sensorless ISFOC induction motor drive based on MRAS scheme", *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Rome, 2010.

Autorzy

mgr inż. Szymon Bednarz
 e-mail: szymon.bednarz@pwr.edu.pl
 Politechnika Wrocławska
 Wydział Elektryczny
 Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
 ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław