

# Zastosowanie algorytmu identyfikacji rezystancji wirnika do diagnostyki silnika indukcyjnego w czasie rzeczywistym

Szymon Bednarz, Mateusz Dybkowski

## 1. Wstęp

Silniki indukcyjne (SI) znajdują szerokie zastosowanie w wielu aplikacjach przemysłowych, często odgrywając kluczowe role w procesach technologicznych [8]. 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 [3, 5, 11]. Każde z wyżej wymienionych uszkodzeń powinno być wykryte w możliwie jak najkrótszym czasie, przez co możliwe jest uniknięcie dalszej degradacji maszyny lub współpracujących z nią podzespołów. Dzięki takim działaniom można ograniczyć straty finansowe oraz zwiększyć poziom bezpieczeństwa obsługi danego procesu. Wczesne wykrywanie uszkodzeń silników indukcyjnych stanowi pole badań dla wielu krajowych [4, 5, 9–12] oraz zagranicznych [1, 2, 3, 6] ośrodków naukowych.

Uszkodzenia wirnika stanowią około 10% wszystkich uszkodzeń występujących w silnikach indukcyjnych [3, 5, 11], jednak ich wczesne wykrywanie stanowi ważne zagadnienie. Obecnie stosuje się wiele technik pozwalających skutecznie realizować to zadanie. Między innymi metody oparte na analizie widmowej prądów fazowych stojana z wykorzystaniem Szybkiej Transformacji Fouriera (FFT) lub detektory neuronowe i układy oparte na logice rozmytej [3, 5].

Inne podejście, które po raz pierwszy zostało zaproponowane w [2], bazuje na założeniu, że uszkodzenia mogą objawiać się zmianami parametrów silnika. Degradacja prętów klatki wirnika może skutkować wzrostem rezystancji zastępczej wirnika. Zastosowanie tej techniki do wykrywania uszkodzeń wymaga zastosowania układów do identyfikacji parametrów schematu zastępczego silnika. W literaturze można spotkać się z zastosowaniem algorytmów offline bazujących na Metodzie Najmniejszych Kwadratów [2] lub programowaniu nieliniowym [1] oraz estymatorów pracujących online, opartych na Rozszerzonym Filtrze Kalmana [6, 12] lub Rozszerzonym Obserwatorze Luenbergera [4].

W niniejszym artykule przedstawiono zastosowanie algorytmu, pracującego w czasie rzeczywistym, do identyfikacji rezystancji wirnika, który bazuje technice MRAS (ang. *Model Reference Adaptive System*). Informacja o wartości rezystancji wykorzystywana została do wykrywania uszkodzeń prętów klatki wirnika. W artykule przedstawiono wyniki symulacji, które zrealizowano w środowisku MATLAB/Simulink, oraz wybrane wyniki eksperymentalne.

**Streszczenie:** W artykule omówiono możliwość wykrywania uszkodzenia prętów klatki wirnika silnika indukcyjnego z zastosowaniem techniki opartej na identyfikacji parametrów schematu zastępczego maszyny. Metodyka ta bazuje na założeniu, że wybrane uszkodzenia mogą objawiać się zmianami parametrów silnika, a ich identyfikacja w czasie rzeczywistym i obserwowanie tych zmian pozwala na wczesną identyfikację uszkodzenia. W pracy wykorzystano fakt, że w przypadku pęknięcia prętów klatki wirnika symptomem uszkodzenia jest wzrost rezystancji schematu zastępczego wirnika. Do odtwarzania tego parametru zastosowano estymator adaptacyjny z modelem odniesienia (MRAS). Badania silnika indukcyjnego przeprowadzono w układzie bezpośredniego sterowania polowo zorientowanego (DFOC). W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, uszkodzenie wirnika, identyfikacja rezystancji wirnika, MRAS, DFOC

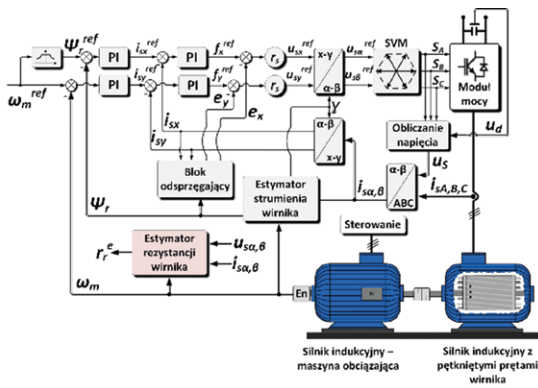
## APPLICATION OF ROTOR RESISTANCE IDENTIFICATION ALGORITHM FOR REAL-TIME DIAGNOSTICS OF INDUCTION MOTOR

**Abstract:** This paper deals with the broken rotor bars detection in squirrel-cage induction motor using parameter identification approach. This method is based on the assumption, that the chosen failures may result in motor parameters variations. Real-time identification and observation of parameters variation allows to incipient fault detection. Increase of the rotor resistance value may be a good fault symptom, in the case of rotor bar damage. In the paper, the rotor resistance estimator based on the model reference adaptive system (MRAS) is utilized. The induction motor is operating in the direct field-oriented control structure, under different conditions. In the paper simulation and experimental results are shown.

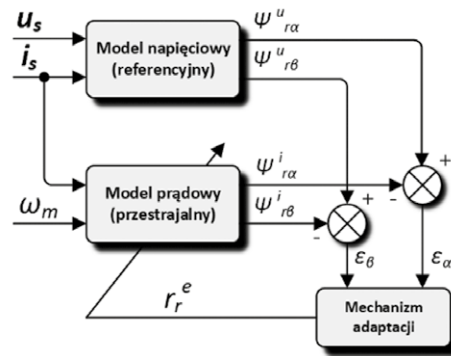
Keywords: induction motor, rotor fault, rotor resistance identification, MRAS, DFOC

## 2. Układ sterowania wektorowego dla silnika indukcyjnego

Biorąc pod uwagę fakt, że obecnie silniki indukcyjne coraz częściej zasilane są poprzez przemienniki częstotliwości,



Rys. 1. Bezpośrednia połowo zorientowana, wektorowa struktura sterowania dla silnika indukcyjnego



Rys. 2. Struktura estymatora rezystancji wirnika [14]

badania przeprowadzono dla silnika pracującego w wektorowej połowo zorientowanej strukturze sterowania DFOC (ang. *Direct Field-Oriented Control*). Analizowany układ sterowania przedstawiono na rys. 1.

Metoda sterowania połowo zorientowanego FOC umożliwia dokładną regulację momentu i/lub prędkości silnika indukcyjnego, dlatego znajduje zastosowanie w wielu aplikacjach przemysłowych. Idea jej działania została szczegółowo omówiona w [7] i [13]. Cechą charakterystyczną tej techniki jest to, że do prawidłowej pracy układu konieczna jest między innymi informacja o aktualnym położeniu i module wektora strumienia skojarzonego wirnika, który jest trudno mierzalnym sygnałem. Z tego powodu do jego odtwarzania wykorzystuje się estymatory zmiennych stanu [7]. Jednym z nich może być tzw. symulator/model prądowy. Jego model matematyczny wyrażony jest następująco:

$$\frac{d}{dt} \Psi_r^i = \frac{R_r}{L_r} (L_m \mathbf{i}_s - \Psi_r^i) + j\omega_m \Psi_r^i \quad (1)$$

gdzie:

- $\Psi_r^i$  – wektor strumienia skojarzonego wirnika;
- $\mathbf{i}_s$  – wektor prądu stojana;
- $\omega_m$  – prędkość kątowa wirnika;
- $R_r, L_r, L_m$  – rezystancja i indukcyjność zastępcza wirnika, indukcyjność magnesująca.

W celu detekcji uszkodzeń prętów klatki wirnika układ sterowania został rozszerzony o dodatkowy estymator rezystancji wirnika, który pracuje równolegle (nie jest on wpięty do układu sterowania). Estymator ten, zaproponowany w [14], bazuje na technice MRAS, czyli jest to układ adaptacyjny z modelem odniesienia (rys. 2).

W estymatorze tym jako model odniesienia wykorzystywany jest tzw. symulator napięciowy strumienia wirnika, który charakteryzuje się niezależnością od rezystancji wirnika [7, 14]. Model ten opisany jest zależnością:

$$\frac{d}{dt} \Psi_r^v = \frac{L_r}{L_m} \left( \mathbf{u}_s - \left( R_s + \sigma L_s \frac{d}{dt} \right) \mathbf{i}_s \right) \quad (2)$$

gdzie:

- $\Psi_r^v$  – wektor strumienia skojarzonego wirnika;
- $\mathbf{u}_s$  – wektor napięcia stojana;
- $R_s, L_s$  – rezystancja i indukcyjność zastępcza stojana,

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}.$$

Modelem przestrajalnym jest symulator prądowy (1), który zależy od wartości tego parametru. Idea działania układu bazuje na minimalizacji błędów  $\epsilon_\alpha, \epsilon_\beta$  wynikających z różnicy estymacji składowych strumienia między symulatorami:

$$\begin{cases} \epsilon_\alpha = \Psi_{r\alpha}^v - \Psi_{r\alpha}^i, & \epsilon_\beta = \Psi_{r\beta}^v - \Psi_{r\beta}^i \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:

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

Błędy te wykorzystuje się w algorytmie adaptacji, który opisany jest zależnością:

$$R_r^{est} = \int A_1 dt + A_2 \quad (4)$$

gdzie:

$$\begin{cases} A_1 = K_1 \left[ \left( \frac{-\Psi_{r\alpha}^i + L_s i_{\alpha s}}{L_r} \right) \epsilon_\alpha + \left( \frac{-\Psi_{r\beta}^i + L_s i_{\beta s}}{L_r} \right) \epsilon_\beta \right] \\ A_2 = K_2 \left[ \left( \frac{-\Psi_{r\alpha}^i + L_s i_{\alpha s}}{L_r} \right) \epsilon_\alpha + \left( \frac{-\Psi_{r\beta}^i + L_s i_{\beta s}}{L_r} \right) \epsilon_\beta \right] \end{cases} \quad (5)$$

Parametry  $K_1, K_2$  są stałymi, niezerowymi współczynnikami.

### 3. Badania symulacyjne

W trakcie badań symulacyjnych wykorzystano obwodowy model matematyczny silnika indukcyjnego z uszkodzonymi prętami klatki wirnika, który został szczegółowo omówiony w [10]. W modelu tym uszkodzenie pręta powoduje wzrost wartości rezystancji wirnika, która dodatkowo posiada oscylacje zależne od stopnia uszkodzenia wirnika. Rezystancja ta powoduje modulację prądu wirnika i innych zmiennych stanu maszyny.

Badania przeprowadzono dla silnika indukcyjnego o 22 prętach, a jego dane znamionowe i parametry zestawiono w tabelach 1 i 2.

Podczas symulacji założono, że silnik pracuje ze stałą prędkością zadaną oraz momentem obciążenia. Symulowano całkowite pęknięcie prętów. Moment oraz liczbę uszkodzonych prętów przedstawiono na rys. 3 w postaci strzałek i odpowiednich wartości liczbowych. Algorytm identyfikacji rezystancji wirnika uruchamiano w czasie  $t = 2$  s. Analizując wyniki z rys. 3, można zauważyć, że uszkodzenie prętów powoduje wzrost wartości rezystancji wirnika, a estymator poprawnie odtwarza jej wartość (uśredniając przebieg rzeczywisty).

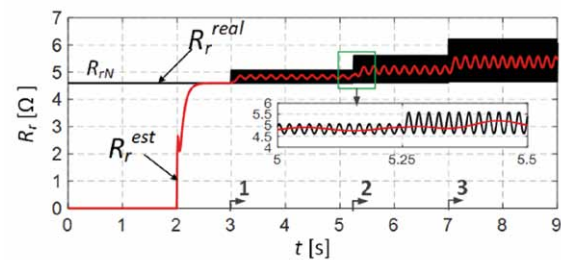
Ponadto można zauważyć, że uszkodzenie powoduje modulację prądu fazowego  $i_{sA}$  (rys. 4) oraz momentu elektromagnetycznego silnika (rys. 5 a), co w konsekwencji przekłada się na drgania maszyny.

Tabela 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

Tabela 2. Parametry schematu zastępczego silnika indukcyjnego

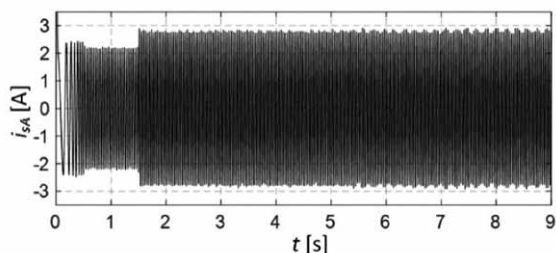
Wielkość	$R_s$	$R_r$	$X_s$	$X_r$	$X_m$
Wartość [ $\Omega$ ]	5,9	4,6	131,1	131,1	123,3



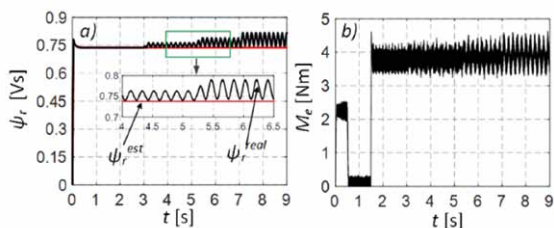
Rys. 3. Przebiegi rzeczywistej  $R_r^{real}$  i estymowanej  $R_r^{est}$  rezystancji wirnika podczas uszkodzenia prętów dla  $n = 0,5n_N$  oraz  $M_o = 0,5M_N$

reklama

reklama



Rys. 4. Przebiegi prądu fazy A silnika indukcyjnego podczas uszkodzenia prętów dla  $n = 0,5n_N$  oraz  $M_o = 0,5M_N$



Rys. 5. Przebiegi estymowanego  $\psi_r^{est}$  i rzeczywistego  $\psi_r^{real}$  strumienia skojarzonego wirnika (a) oraz momentu elektromagnetycznego (b) podczas uszkodzenia prętów dla  $n = 0,5n_N$  oraz  $M_o = 0,5M_N$

Dodatkowym zjawiskiem, jakie można zaobserwować, jest błąd odtwarzania strumienia skojarzonego wirnika, który powstaje na skutek zmiany  $R_r$ . W układach sterowania wektorowego zjawisko to jest niepożądane, ponieważ może powodować nieprawidłowe działanie układu regulacji.

#### 4. Badania eksperymentalne

Weryfikację eksperymentalną przeprowadzono na stanowisku wyposażonym w silnik z zestawem wirników, w których dokonano fizycznego uszkodzenia prętów klatki poprzez ich przewiercenie.

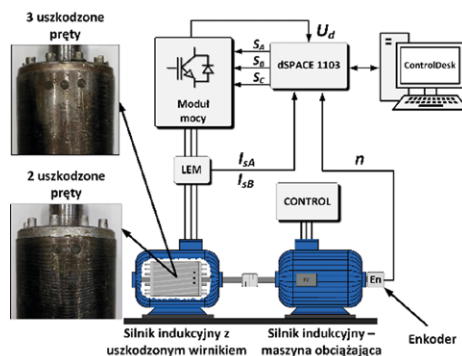
Silnik indukcyjny zasilany był przez falownik napięcia, którego algorytm sterowania DFOC został zaimplementowany w układzie do szybkiego prototypowania dSPACE 1103. Jako maszynę obciążającą zastosowano silnik indukcyjny sterowany z oddzielnego falownika napięcia. Schemat poglądowy stanowiska przedstawiono na rys. 6.

Badania przeprowadzono dla wirnika nieuszkodzonego oraz dla dwóch i trzech uszkodzonych prętów. Ponadto układ badano dla stałej prędkości kątowej wirnika oraz momentu obciążenia. Wyniki przedstawiono na rys. 7.

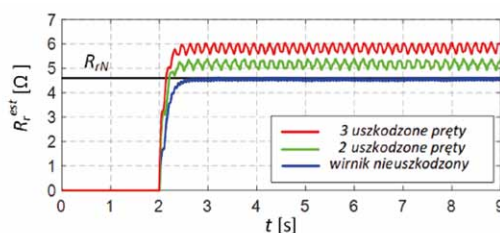
Można zauważyć, że wartość estymowanej rezystancji wirnika rzeczywiście wzrasta na skutek uszkodzenia prętów. Należy jednak zaznaczyć, że zmiany wartości tego parametru mogą również zachodzić na skutek nagrzewania się uzwojeń silnika. Jednakże charakter zmian temperaturowych w maszynie jest znacznie wolniejszy niż zmian, które mogą zachodzić wskutek nagłego uszkodzenia pręta klatki.

#### 5. Podsumowanie

Podsumowując otrzymane wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych, można potwierdzić założenie, że rezystancja



Rys. 6. Schemat blokowy stanowiska eksperymentalnego



Rys. 7. Przebiegi rzeczywistej estymowanej  $R_r^{est}$  rezystancji wirnika podczas uszkodzenia prętów dla  $n = 0,25n_N$  oraz  $M_o = 0,5M_N$

wirnika może zostać wykorzystana jako sygnał diagnostyczny do wykrywania uszkodzenia prętów klatki silnika indukcyjnego.


Zastosowanie tej techniki wymaga implementacji algorytmu identyfikacji rezystancji wirnika w czasie rzeczywistym. Struktura zaproponowanego estymatora adaptacyjnego bazuje na prostych, dobrze znanych symulatorach strumienia wirnika, dzięki czemu jego implementacja jest stosunkowo łatwa w realizacji i nie jest znaczącym obciążeniem dla układu mikroprocesorowego.

Zmiany rezystancji wirnika na skutek uszkodzenia prętów klatki negatywnie wpływają na działanie układu napędowego, ponieważ powodują oscylację momentu elektromagnetycznego, a także błąd odtwarzania strumienia wirnika, co może przełożyć się na pogorszenie właściwości układu napędowego, dlatego wydaje się uzasadnione ich kompensowanie.

#### Literatura

- [1] BACHIR S., TNANI S., TRIGEASSOU J.C., CHAMPENOIS G.: *Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 3/2006.
- [2] CHO K.R., LANG J.H., UMANS S.D.: *Detection of broken bars in induction motor using state and parameter estimation*. IEEE Transactions on Industry Applications, 3/1992.
- [3] FILIPETTI F., BELLINI A., CAPOLINO G.A.: *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.

- [4] KOWALSKI Cz.T., WIERZBICKI R.: *Zastosowanie rozszerzonego obserwatora stanu i parametrów do wykrywania uszkodzeń uzwojenia wirnika oraz stojana silnika indukcyjnego*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 84/2009.
- [5] KOWALSKI Cz.T.: *Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- [6] NAIT SAID M.S., BENBOUZID M., BENCHAIIB A.: *Detection of broken bars in induction motor using an Extended Kalman Filter for rotor resistance sensorless estimation*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1/2000.
- [7] ORŁOWSKA-KOWALSKA T.: *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [8] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., DYBKOWSKI M.: *Industrial drive systems. Current state and development trends*. „Power Electronics and Drives” 1/2016.
- [9] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., KOWALSKI Cz.T., DYBKOWSKI M.: *Rotor fault analysis in the sensorless field oriented controlled induction motor drive*. „Automatika” 2/2010.
- [10] PAWŁAK M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T.: *Zastosowanie uproszczonego modelu dwuosowego do modelowania uszkodzeń wirnika silnika klatkowego*. „Przegląd Elektrotechniczny” 10/2006.
- [11] SZYMANIEC S.: *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2013.
- [12] WIERZBICKI R., KOWALSKI Cz.T.: *Wykrywanie uszkodzeń uzwojenia wirnika przekształtnikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 87/2010.
- [13] ZAWIRSKI K., DESKUR J., KACZMAREK J.: *Automatyka napędu elektrycznego*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
- [14] AGREBI ZORGANI Y., KOUBAA Y., BOUSSAK M.: *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.

 mgr inż. Szymon Bednarz,  
e-mail: szymon.bednarz@pwr.edu.pl  
dr hab. inż. Mateusz Dybkowski, prof. PWR,  
e-mail: mateusz.dybkowski@pwr.edu.pl  
Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny  
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

artykuł recenzowany

reklama

reklama