

**Robert Wierzbicki, Czesław T. Kowalski**  
**Politechnika Wrocławska**

## **WYKRYWANIE USZKODZEŃ UZWOJENIA WIRNIKA PRZEKSZTAŁTNIKOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM**

### **ROTOR FAULT DETECTION OF PWM INDUCTION MOTOR DRIVE**

**Abstract:** In this paper possibilities of application the extended Kalman filter algorithm to rotor fault detection of induction motor fed by PWM inverter are presented. The induction motor condition is analyzed using estimated rotor resistance. The motor mathematical model of induction motor with rotor damage are described. The fault level is modeled by a change of a numbers of broken rotor bars. The algorithm of extended Kalman filter are presented. Rotor resistance as a additional electromagnetic state variables are selected. A detailed analysis of simulation and experimental results for induction motor with broken rotor bars in open and closed loop are presented. The simulations showed high accuracy and fast response of extended Kalman filter algorithm. The experimental proved theoretical assumption and demonstrated extended Kalman filter suitability to inverter fed induction motor rotor faults detection.

#### **1. Wstęp**

Napędy z silnikami indukcyjnymi klatkowymi są najczęściej wykorzystywane w zastosowaniach przemysłowych, rolnictwie, budownictwie, energetyce, usługach i gospodarce komunalnej. Pomimo ich wysokiej niezawodności, w trakcie ich eksploatacji mogą wystąpić uszkodzenia w elementach elektrycznych uzwojeń wirnika i stojana, w elementach mechanicznych zarówno samego silnika, maszyny roboczej, oraz w elementach regulowanego układu zasilania, np. przemiennika częstotliwości PWM.

Uszkodzenia uzwojenia wirnika (pęknięcia prętów lub pierścienia zwierającego) stanowią ok. 10% wszystkich uszkodzeń silników indukcyjnych [1], [4], [5], [6].

Obecnie głównym sposobem wykrywania uszkodzeń wirników maszyn indukcyjnych klatkowych jest analiza częstotliwościowa sygnałów drgań mechanicznych lub prądu stojana. W sygnałach diagnostycznych poszukuje się charakterystycznych częstotliwości, które są symptomami uszkodzeń uzwojeń wirnika. W napędach przekształtnikowych, gdzie regulacja prędkości silnika dokonywana jest przez zmianę częstotliwości zasilania, pojawiają się dodatkowe problemy związane z pracą w układzie sterowania skalarne lub wektorowe ze zmienną częstotliwością, powodującą odkształcenie prądów i napięć. Ponadto układ sterowania wektorowe będzie próbował kompensować zmiany zachodzące w silniku pod wpływem uszkodzenia. Problemy te utrudniają stosowanie klasycznych metod opartych na anali-

zie widmowej sygnałów diagnostycznych [1], [4], [6].

Trwają poszukiwania nowych metod analizy stanu technicznego napędu. Jedną z stosunkowo mało rozpoznanych dróg jest diagnostyka oparta na modelach matematycznych. Opiera się ona na spostrzeżeniu, 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 stanowią dobre źródło sygnałów diagnostycznych.

W referacie zaprezentowano metodę detekcji uszkodzeń silnika indukcyjnego pracującego w otwartym i zamkniętym układzie sterowania, opartą na estymacji rezystancji uzwojenia wirnika silnika indukcyjnego przy wykorzystaniu rozszerzonego filtru Kalmana. W stanie normalnej pracy silnika, estymowany parametr przyjmuje wartości znamionowe zmieniające się w ograniczonym przedziale. W przypadku wystąpienia uszkodzenia analiza odchylenia estymowanego parametru od wartości znamionowej pozwala wykryć i ocenić stopień uszkodzenia.

#### **2. Model matematyczny silnika indukcyjnego oraz algorytm rozszerzonego filtru Kalmana**

Po uwzględnieniu wszystkich założeń upraszczających [2] model matematyczny maszyny indukcyjnej można zapisać w postaci równań

stanu, w układzie współrzędnych  $(\alpha-\beta)$ , w jednostkach względnych. Ogólnie równanie zmiennych stanu dla modelu silnika indukcyjnego klatkowego [2], [3]:

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

i równanie wyjścia:

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

w którym:

wektor elektromagnetycznych zmiennych stanu:

$$\mathbf{x}(t) = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad \psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta}]^T, \quad (3)$$

wektor wyjścia:

$$\mathbf{y}(t) = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]^T, \quad (4)$$

wektor wejścia (sterowania):

$$\mathbf{u}(t) = [u_{s\alpha} \quad u_{s\beta}]^T, \quad (5)$$

oraz odpowiednio macierz wejścia:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\Omega_b}{\sigma \cdot x_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Omega_b}{\sigma \cdot x_s} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

macierz wyjścia:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

macierz stanu:

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

gdzie:

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

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

$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$  - napięcie stojana w osi  $\alpha, \beta$ ,

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  - prąd stojana w osi  $\alpha, \beta$ ,

$\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$  - strumień wirnika w osi  $\alpha, \beta$ ,

$r_s, r_r$  - rezystancja uzwojenia stojana, wirnika,

$x_s, x_r$  - reaktancja uzwojenia stojana, wirnika,

$x_M$  - reaktancja główna,

$\sigma$  - współczynnik całkowitego rozproszenia maszyny,

$\omega_m$  - prędkość kątowna wirnika,

$\Omega_b$  - pulsacja odniesienia (bazowa).

W celu sprawdzenia założeń teoretycznych w badaniach symulacyjnych wykorzystano uproszczony model matematyczny silnika indukcyjnego z uszkodzonym uzwojeniem wirnika. Rezystancja wirnika znana z klasycznego schematu zastępczego została rozłożona na dwie składowe zapisane odpowiednio w nieruchomym układzie współrzędnych  $\alpha-\beta$ , które są zmieniane w zależności od stopnia uszkodzenia maszyny zgodnie z [5]:

$$r_{r\alpha} = \frac{N \cdot r_{rN}}{2 \cdot \sum_{k=1}^N G_w(k) \cdot \sin^2\left(\theta + \frac{2\pi k}{N}\right)} \quad (9)$$

oraz

$$r_{r\beta} = \frac{N \cdot r_{rN}}{2 \cdot \sum_{k=1}^N G_w(k) \cdot \sin^2\left(\theta + \frac{2\pi k}{N} - \frac{\pi}{2}\right)} \quad (10)$$

gdzie:

$r_{rN}$  - zastępcza rezystancja uzwojenia wirnika bez uszkodzeń,

$\theta$  - kąt położenia wirnika względem stojana;

$N$  - całkowita liczba prętów wirnika,

$G_w = \sum_{k=1}^N G_{pk}$  - macierz konduktancji odpowie-

dzialna za stan  $k$ -tego pręta. Elementy macierzy konduktancji przyjmują wartości z przedziału  $G_{pk} \in \langle 0,1 \rangle$ .

Wykorzystując teorię filtru Kalmana, model matematyczny nieliniowego obiektu dynamicznego, jakim jest silnik indukcyjny, po rozszerzeniu wektora stanu o rezystancję wirnika, należy zapisać w postaci dyskretnej [2]:

$$\mathbf{x}_R(k+1) = \mathbf{A}_R(k)\mathbf{x}_R(k) + \mathbf{B}_R(k)\mathbf{u}_R(k) + \mathbf{w}(k), \quad (11)$$

$$\mathbf{y}_R(k) = \mathbf{C}_R(k)\mathbf{x}_R(k) + \mathbf{v}(k)$$

gdzie:  $\mathbf{w}$  - macierz zakłóceń zmiennych stanu,

$\mathbf{v}$  - macierz zakłóceń sygnałów wyjściowych.

Przyjmując rezystancję uzwojenia wirnika jako dodatkowy element rozszerzonego wektora elektromagnetycznych zmiennych stanu otrzymuje się [2], [3]:

$$\mathbf{x}(t) = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad \psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta} \quad r_r]^T. \quad (12)$$

Estymacja parametru odbywa się w kolejnych krokach [3]:

- **krok 1** – obliczenie wartości predykatora wektora stanu w chwili  $(k+1)$  na podstawie wejścia  $\mathbf{u}(k)$  i estymaty stanu w poprzedniej chwili,
- **krok 2** – obliczenie macierzy kowariancji błędu predykcji,
- **krok 3** – obliczenie macierzy wzmocnienia filtra Kalmana,
- **krok 4** – obliczenie skorygowanej estymaty wektora stanu,
- **krok 5** – obliczenie macierzy kowariancji błędu estymaty,
- **krok 6** – powrót do kroku pierwszego.

### 3. Metodyka badań

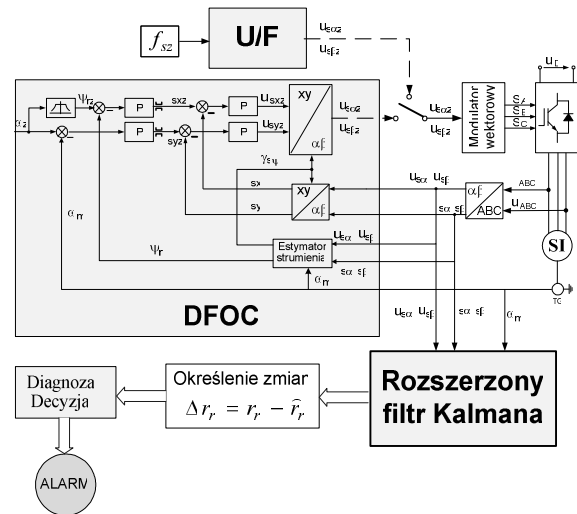
Badania symulacyjne i laboratoryjne przeprowadzono dla silnika indukcyjnego małej mocy typu Sh 90L4 (1,5 kW, 28 prętów wirnika) zasilanego z przekształtnika częstotliwości PWM. Model silnika umożliwia symulację uszkodzeń klatki wirnika przez określenie liczby przerwanych prętów. W badaniach symulacyjnych zarówno model silnika, jak i algorytm rozszerzonego filtra Kalmana został w całości wykonany w programie Matlab. Znamionowe wartości rezystancji uzwojenia wirnika i stojana wynoszą odpowiednio:  $r_r=0,1$  [p.u.],  $r_s=0,0737$  [p.u.].

Silnik w badaniach eksperymentalnych wyposażony był w wirniki z różną ilością uszkodzonych prętów w klatce wirnika. Wykorzystano wirniki z 1, 2, 4, 5, 6 i 8 przerwanymi prętami. Aplikacja laboratoryjna została oprogramowana na platformie obliczeniowej dSpace 1104 wyposażonej w procesor sygnałowy i napisana w języku C. Schemat blokowy przedstawiający zaimplementowane struktury przedstawiono na rys. 1.

Pierwsza część badań dotyczyła sterowania silnika w otwartej pętli regulacji przy wykorzystaniu metody  $U/f=\text{const}$ . W drugim etapie badań wykorzystano wektorowe bezpośrednio polowo-zorientowane sterowanie prędkości silnika indukcyjnego. Jako estymator strumienia wirnika wykorzystano prądowy model strumienia [2].

Rozszerzony filtr Kalmana został wykorzystany jako dodatkowy estymator, który odpowiedzialny jest za śledzenie zmian rezystancji wirnika. Na podstawie zmian estymowanej rezy-

stancji wirnika podejmowana jest decyzja o uszkodzeniu maszyny.

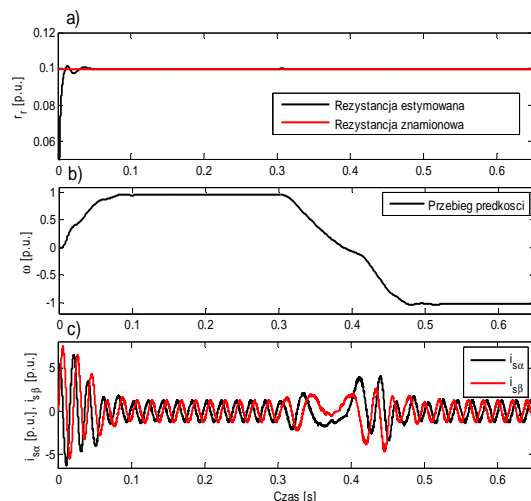


Rys. 1. Schemat blokowy układu detekcji uszkodzenia wirnika

### 4. Wyniki badań symulacyjnych

W celu sprawdzenia założeń teoretycznych i możliwości zastosowania algorytmu rozszerzonego filtra Kalmana do wykrywania uszkodzeń uzwojenia wirnika silnika indukcyjnego przeprowadzono symulację pracy silnika wraz z estymatorem rezystancji.

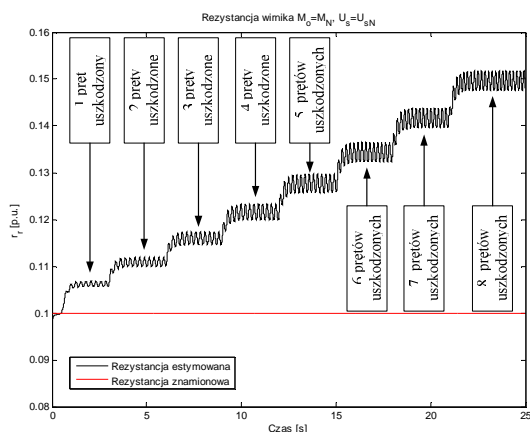
W pierwszym etapie badań symulacyjnych silnik indukcyjny zasilany był z przekształtnika napięcia PWM pracującego w otwartej pętli regulacji.



Rys. 2. Przebiegi estymowanej i znamionowej rezystancji uzwojenia wirnika (a), prędkości silnika (b) oraz prądów stojana (c)

Na rys. 2a przedstawiono przebiegi estymowanej i rzeczywistej rezystancji uzwojenia wirnika. Na rys. 2b widoczny jest przebieg prędkości

silnika, a na rys. 2c widoczne są prądy stojana w osi  $\alpha$  oraz w osi  $\beta$ . Proces rozruchu częstotliwościowego, który trwa do chwili  $t=0,1s$ , jest symulowany przy założeniu zerowej wartości początkowej rezystancji wirnika. W chwili  $t=0,3s$  rozpoczyna się nawrót silnika, który trwa do chwili  $t=0,48s$ . Przebiegi na rys. 2 przedstawione są dla znamionowego obciążenia maszyny.



Rys. 3. Przebiegi estymowanej i znamionowej rezystancji uzwojenia wirnika dla różnych przypadków uszkodzenia wirnika

Na rys. 3 przedstawiono estymowaną oraz znamionową rezystancję uzwojenia wirnika dla znamionowych warunków zasilania oraz znamionowego obciążenia silnika indukcyjnego. Symulacje przedstawiono dla kolejnych uszkodzeń prętów wirnika załączanych w różnych czasach zgodnie z tab. 1.

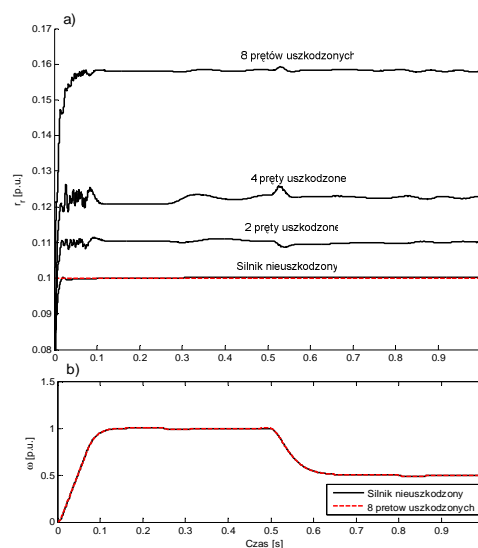
Tab. 1. Czasy symulowania uszkodzeń wirnika

Czas [s]	0,5	3	6	9	12	15	18	22
Uszkodzone pręty	1	2	3	4	5	6	7	8

W drugim etapie badań symulacyjnych silnik indukcyjny zasilany był z przekształtnika napięcia PWM pracującego w zamkniętej wektorowej połowo-zorientowanej strukturze regulacji prędkości.

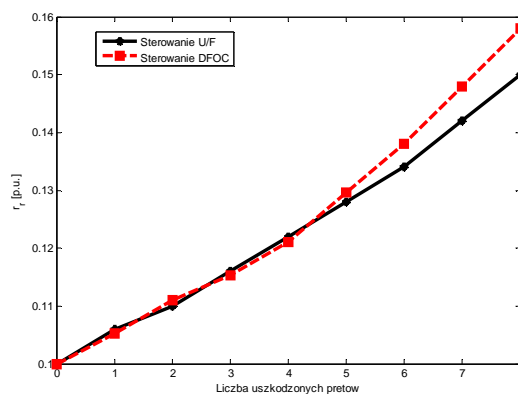
Na rys. 4a przedstawiono przebiegi estymowanej rezystancji uzwojenia wirnika dla różnej liczby uszkodzonych prętów. W każdym przypadku rozruch silnika dokonywany był częstotliwościowo do chwili  $t=0,1s$ . W chwili  $t=0,25s$  załączono połowę znamionowego momentu obciążenia maszyny. Po czasie  $t=0,5s$  zadana wartość prędkości została ustalona na połowę prędkości znamionowej silnika. W chwili  $t=0,8s$  załączono znamionowy moment obciążenia ma-

szyny. Na rys. 4b przedstawiono przebiegi prędkości silnika dla nieuszkodzonego silnika oraz silnika z 8 prętami uszkodzonymi.



Rys. 4. Przebiegi rezystancji uzwojenia wirnika (a) oraz przebiegi prędkości wirnika (b) dla różnych przypadków uszkodzenia wirnika

Na rys. 5 przedstawiono zestawienie wyników symulacyjnych. Przedstawiono estymowane wartości rezystancji uzwojenia wirnika w zależności od stopnia uszkodzenia wirnika silnika indukcyjnego. Wyniki zaprezentowano zarówno dla otwartego oraz zamkniętego układu sterowania prędkością.



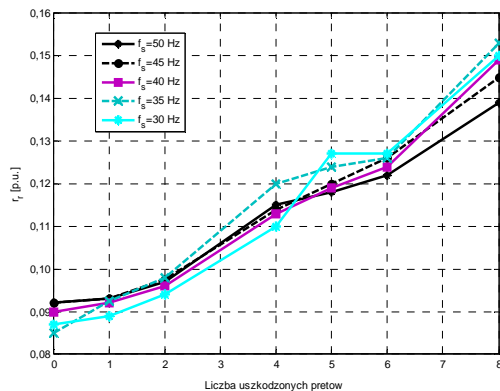
Rys. 5. Zależność rezystancji uzwojenia wirnika od różnej liczby uszkodzonych prętów wirnika

Uzyskane wyniki symulacyjne wykazały bardzo dużą zbieżność zastosowanego algorytmu rozszerzonego filtru Kalmana. Estymowana rezystancja, w obu analizowanych strukturach sterowania, rośnie liniowo w zależności od uszkodzenie wirnika silnika indukcyjnego. Estymowany parametr może być wskaźnikiem uszkodzenia wirnika silnika indukcyjnego. Wyniki

badan symulacyjnych pozwoliły na przystąpienie do badań eksperymentalnych.

## 5. Wyniki badań eksperymentalnych

Na rys. 6 przedstawiono estymowane wartości rezystancji uzwojenia wirnika dla różnych uszkodzeń klatki wirnika i różnych częstotliwości zasilania. W przypadku przedstawionym na rys. 6 silnik zasilany był w otwartym układzie sterowania i obciążony znamionowym momentem.



Rys. 6. Zależność rezystancji uzwojenia wirnika od różnej liczby uszkodzonych prętów wirnika dla różnych częstotliwości zasilania

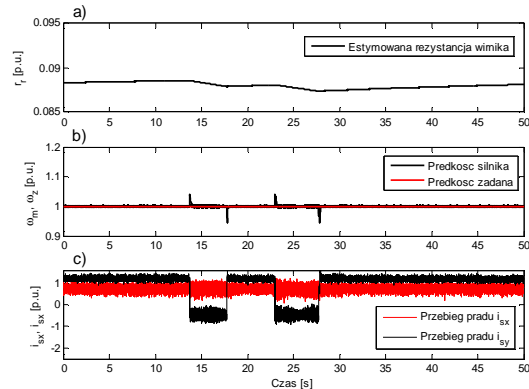
Przebiegi na rysunkach 7-10 przedstawiają możliwości estymacji rezystancji uzwojenia wirnika w zamkniętej strukturze sterowania wektorowego.

Rys. 7 (silnik z nieuszkodzonym wirnikiem) i rys. 8 (silnik z 8 uszkodzonymi prętami wirnika) przedstawiają zachowanie się układu w przypadku załączenia skokowego momentu obciążenia. Na rys. 7 znamionowy moment obciążenia załączany jest w chwili  $t = 13$ s oraz w  $t = 22$ s, a odłączany odpowiednio dla każdego przypadku w chwili  $t = 18$ s oraz w  $t = 22,5$ s, natomiast na rys. 8 moment obciążenia załączany jest w chwili  $t = 6$ s oraz w  $t = 27$ s, a odłączany odpowiednio dla każdego przypadku w chwili  $t = 12$ s oraz w  $t = 34$ .

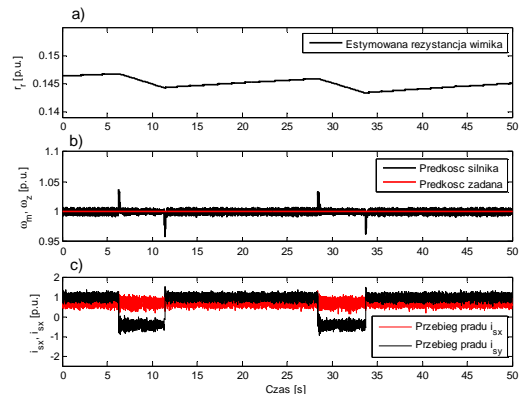
Na rys. 7a oraz rys. 8a przedstawiono estymowaną rezystancję wirnika. Na rys. 7b oraz 8b przedstawiono przebiegi prędkości zadanej oraz zmierzonej, a na rys. 7c i 8c prądy w osi x-y.

Na rys. 9a oraz rys. 10a przedstawiono estymowaną rezystancję dla zmiennej wartości zadanej prędkości silnika. Na rys. 9b oraz 10b przedstawiono przebiegi prędkości zadanej oraz zmierzonej a na rys. 9c i 10c prądy w osi x-y. Przebiegi na rys. 9 zarejestrowano dla silnika z

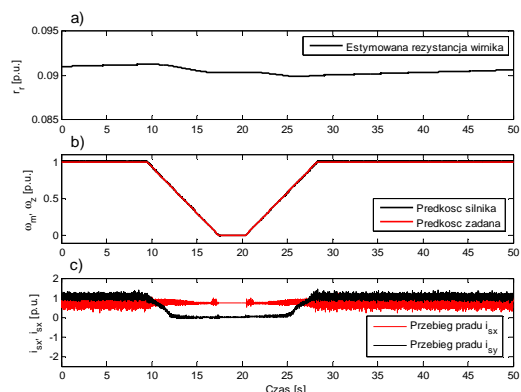
nieuszkodzonym wirnikiem, a na rys. 10 z wirnikiem z uszkodzonymi 8 prętami.



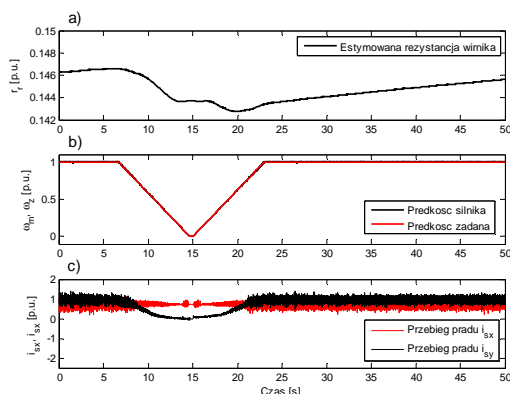
Rys. 7. Przebiegi rezystancji uzwojenia wirnika (a), zadanej i zmierzonej prędkości silnika (b) oraz prądów stojana (c) dla nieuszkodzonego silnika i zmiennego momentu obciążenia



Rys. 8. Przebiegi rezystancji uzwojenia wirnika (a), zadanej i zmierzonej prędkości silnika (b) oraz prądów stojana (c) dla silnika z ośmioma uszkodzonymi prętami wirnika i zmiennego momentu obciążenia

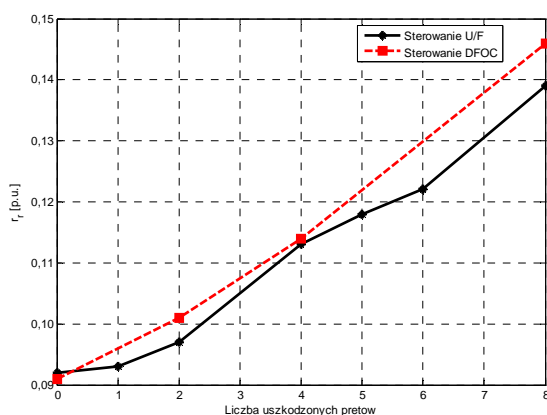


Rys. 9. Przebiegi rezystancji uzwojenia wirnika (a), zadanej i zmierzonej prędkości silnika (b) oraz prądów stojana (c) dla nieuszkodzonego silnika



Rys. 10. Przebiegi rezystancji uzwojenia wirnika (a), zadanej i zmierzonej prędkości silnika (b) oraz prądów stojana (c) dla silnika z ośmioma uszkodzonymi prętami wirnika

Na rys. 11 przedstawiono zestawienie wyników eksperymentalnych. Przedstawiono estymowane wartości rezystancji uzwojenia wirnika w zależności od stopnia uszkodzenia wirnika silnika indukcyjnego. Wyniki zaprezentowano zarówno dla otwartego oraz zamkniętego układu sterowania prędkością.



Rys. 11. Zależność rezystancji uzwojenia wirnika od liczby uszkodzonych prętów wirnika

Wystąpienie uszkodzenia pręta wirnika powoduje istotny wzrost wartości estymowanej rezystancji. Przerwanie 8 prętów wirnika powoduje około 45% wzrost estymowanej rezystancji. Zastosowany algorytm pozwala więc na wykrycie wstępnej fazy uszkodzenia.

## 6. Uwagi końcowe

Przeprowadzone badania symulacyjne oraz eksperymentalne z zastosowaniem rozszerzonego filtra Kalmana do monitorowania stanu technicznego uzwojenia wirnika silnika indukcyjnego klatkowego potwierdziły skuteczność tego typu algorytmu w wykrywaniu uszkodzeń. Filtr Kalmana wykazuje wrażliwość na zmianę

parametrów. Skuteczność detekcji uszkodzenia potwierdzono zarówno w otwartym jak i zamkniętym układzie sterowania prędkością silnika indukcyjnego. Wykazano, że zmiana napięcia zasilania oraz zmienne warunki pracy nie wykluczają możliwości wykrycia uszkodzenia. Wydaje się, że podejście oparte o modelowanie matematyczne i estymację zmiennych stanu oraz parametrów może być alternatywą dla stosowanych obecnie metod detekcji i zdaniem autorów powinno być rozwijane.

## Literatura

- [1] Kowalski CZ. T.: *Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych P. Wr., seria Monografie nr 18, zeszyt 57, 2005.
- [2] Orłowska-Kowalska T.: *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003.
- [3] Kowalski Cz., Wierzbicki R.: *Application of the extended Kalman filter for rotor and stator fault detection of the induction motor*. Electrical Engineering, Poznan University of Technology Academic Journals, 2007, is. 55, s. 145-155.
- [4] Bellini A., Filippetti F., Tassoni C., Capolino G.: *Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines*. IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 55, no. 12, 2008, s. 4109-4126.
- [5] Pawlak M., Orłowska-Kowalska T.: *Zastosowanie uproszczonego modelu dwuosiowego do modelowania uszkodzeń wirnika silnika klatkowego*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 10, 2006, s. 48-53.
- [6] Bachir S., Tnani S., Trigeassou J., Champenois G.: *Diagnosis by Parameter Estimation of Stator and Rotor Faults Occurring in Induction Machines*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 3, 2006, s. 963-973.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009 -2010 jako projekt badawczy N510 358436

## Autorzy

dr hab. inż. Czesław T. Kowalski, prof. P.Wr.

E-mail: [czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl](mailto:czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl),

mgr inż. Robert Wierzbicki

E-mail: [robert.wierzbicki@pwr.wroc.pl](mailto:robert.wierzbicki@pwr.wroc.pl),

Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław.

## Recenzent

Prof. dr hab. inż. Jerzy Hickiewicz