ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001

Seria: ELEKTRYKA z. 177 Nr kol. 1501

Cezary ORLIKOWSKI[1], Leon SWĘDROWSKI[2],

WYKORZYSTANIE MODELU MATEMATYCZNEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO DO ANALIZ DIAGNOSTYCZNYCH

Streszczenie. Dziedziną zainteresowań autorów artykułu jest diagnostyka silników elektrycznych indukcyjnych, a szczególnie diagnostyka przy wykorzystaniu pomiarów prądu zasilającego silnik. Problemy pomiarowe składowych harmonicznych wynikają z tego, że składowe niosące informacje diagnostyczne są małe w porównaniu z dominującą składową sieciową. Wyodrębnienie ich wymaga specjalnej metody analizy. Problemy interpretacyjne wyników wiążą się z koniecznością posiadania odpowiednich modeli matematycznych silnika. W niniejszym referacie przedstawiono próbę skonstruowania modelu silnika w oparciu o metodę grafów wiązań. Daje to ujednolicone podejście do opisu części elektrycznej oraz mechanicznej, a także przetwarzania energii elektrycznej w mechaniczną i odwrotnie w układzie elektromechanicznym, jakim jest rozważany silnik.

W referacie przedstawiono model i wstępne wyniki badań jego wrażliwości na określone rodzaje uszkodzeń. Przedstawiono także wyniki badań eksperymentalnych przy użyciu specjalnej metody pomiarowej.

INDUCTION MOTOR MATHEMATICAL MODEL FOR DERIVING DIAGNOSTIC CORRELATIONS

Summary. The domain of interest of the authors of the paper is diagnostics of induction motors; especially diagnostics by investigations of the motor supply current. The defined faults in the motor are sources of current distortions. The measurement problems result from small values of the components due to faults in comparison to the first harmonic of the supply current. Mathematical models of a motor are necessary for interpretation of diagnostic results. In the paper there is presented a first approach to creation of the model. The model and the results of investigations of its sensitivity to the defined faults in the motor are presented in the paper. The results of experimental tests are given as well.

Key words: induction motors, diagnostics

1. WSTĘP

Współczesne zagadnienia diagnostyki technicznej wiążą się z dużą złożonością problemów pomiarowych występujących w diagnostyce, a także z zagadnieniem interpretacji wyników, zmuszającej do obróbki mierzonych sygnałów celem wydobycia określonych informacji diagnostycznych.

Dziedziną zainteresowań autorów referatu jest diagnostyka silników elektrycznych indukcyjnych, a szczególnie diagnostyka przy wykorzystaniu pomiarów prądu zasilającego silnik. Pojawienie się określonych typów uszkodzeń w silniku jest źródłem odkształcenia tego prądu. Poddając przebieg prądu analizie widmowej uzyskuje się szereg nowych składowych, które związane są z określonymi typami uszkodzeń. Problemy pomiarowe wynikają z tego, że składowe niosące informacje diagnostyczne są małe w porównaniu z dominującą składową sieciową. Wyodrębnienie ich wymaga specjalnej metody analizy. Problemy interpretacyjne wyników wiążą się z koniecznością posiadania odpowiednich modeli matematycznych silnika.

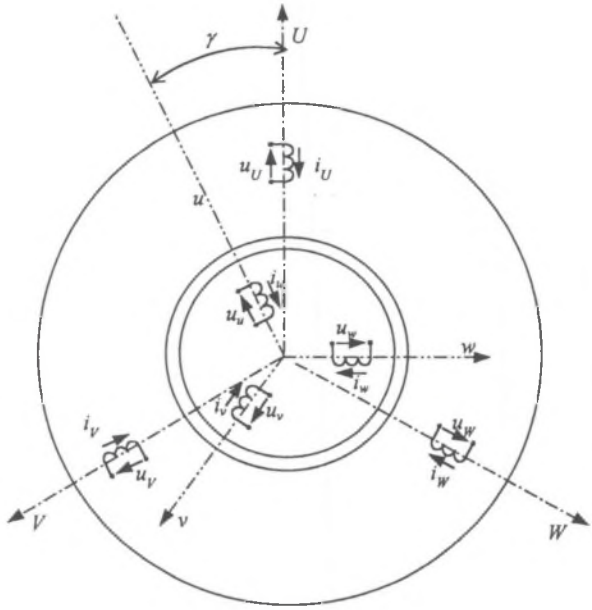
Jedną z metod diagnostyki jest modelowanie, które umożliwia przeprowadzenie wnioskowania diagnostycznego w badaniach symulacyjnych. Podstawowym elementem w diagnostyce symulacyjnej jest model obiektu. Aby możliwe było uzyskanie wiarygodnych relacji diagnostycznych, model obiektu powinien możliwie dokładnie opisywać właściwości obiektu. Mając

[1] Dr inż., Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk
tel: (058) 3471912 fax: (058) 3472151 e-mail:corlikow@sunrise.pg.gda.pl
[2] Dr inż., Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk
tel: (058) 3471284 fax: (058) 3471726 e-mail:lswed@ely.pg.gda.pl

taki model można symulować określone typy uszkodzeń i badać jego odpowiedź w celu określenia relacji, które mogą być wykorzystane w diagnostyce. W artykule przedstawiono próbę budowy modelu i wstępne wyniki badań wrażliwości tego modelu na określone rodzaje uszkodzeń. Na tej podstawie będzie można sformułować założenia do zaprojektowania systemu ekspertowego, diagnozującego silnik indukcyjny.

2. ZALEŻNOŚCI WYJŚCIOWE DO BUDOWY MODELU

Do budowy modelu silnika indukcyjnego przyjęto ogólny schemat podany na rysunku 1 [1].



Rys.1. Układ i oznaczenia uzwojeń trójfazowej maszyny indukcyjnej
Fig. 1. The structure and symbols of a three-phase induction machine

Przy budowie modelu przyjęto następujące założenia upraszczające: silnik jest pierścieniowy; pominięto udział rozproszenia w indukcyjnościach wzajemnych zarówno stojana jak i wirnika.

Dla silnika indukcyjnego, którego ogólny schemat podano na rysunku 1, równania prądowo-napięciowe dla stojana (duże indeksy) i dla wirnika (małe indeksy) mają postać [1]:

$$
\begin{aligned}
u_U &= R_S i_U + d\varphi_U/dt\ , & u_u &= R_r i_u + d\varphi_u/dt\ ,\\
u_V &= R_S i_V + d\varphi_V/dt\ , & u_v &= R_r i_v + d\varphi_v/dt\ , \qquad (1)\\
u_W &= R_S i_W + d\varphi_W/dt\ , & u_w &= R_r i_w + d\varphi_w/dt\ .
\end{aligned}
$$

Strumienie magnetyczne skojarzone z poszczególnymi uzwojeniami stojana określa się następującymi zależnościami:

$$
\begin{aligned}
\varphi_U &= L_S i_U - L_G i_V/2 - L_G i_W/2 + L_m\left[i_u\cos\gamma + i_v\cos(\gamma+2\pi/3) + i_w\cos(\gamma-2\pi/3)\right],\\
\varphi_V &= L_S i_V - L_G i_U/2 - L_G i_W/2 + L_m\left[i_u\cos(\gamma-2\pi/3) + i_v\cos\gamma + i_w\cos(\gamma+2\pi/3)\right], \qquad (2)\\
\varphi_W &= L_S i_W - L_G i_U/2 - L_G i_V/2 + L_m\left[i_u\cos(\gamma+2\pi/3) + i_v\cos(\gamma-2\pi/3) + i_w\cos\gamma\right]\ ,
\end{aligned}
$$

gdzie:

L_s - indukcyjność własna uzwojenia stojana równa $L_{\sigma S}+L_G$, gdzie $L_{\sigma S}$ jest indukcyjnością rozproszenia, a L_G jest indukcyjnością główną uzwojenia stojana,

L_r - indukcyjność własna uzwojenia wirnika,

L_m - indukcyjność wzajemna współosiowo położonych uzwojeń stojana i wirnika .

Dla wirnika zależności są analogiczne.

Do równań opisujących część elektryczną silnika należy jeszcze dołączyć równanie części mechanicznej:

$$m_e(t) = J\frac{d\omega(t)}{dt} + m_o(t) \ ,$$

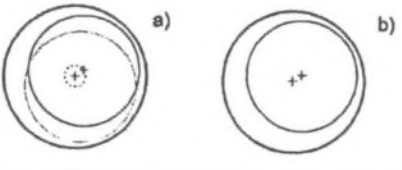
gdzie: J - moment bezwładności silnika, $\omega(t)$- prędkość kątowa wirnika, $m_o(t)$ -moment obciążenia zewnętrznego silnika , $m_e(t)$ - moment rozwijany przez silnik.

3. MODEL SILNIKA USZKODZONEGO

Rozważane będą dwa rodzaje uszkodzeń silnika – typu elektrycznego i mechanicznego. Dla obydwu rodzajów uszkodzeń występują określone zmiany w modelu matematycznym silnika.

W celu zamodelowania niesymetrii rezystancji wirnika w macierzy rezystancji wirnika zmieniono jeden z elementów $(R_r \rightarrow R_{r1})$.

Modelowano dwa typy nieosiowości: dynamiczną i statyczną. Z nieosiowością dynamiczną mamy do czynienia, gdy w czasie pracy silnika oś symetrii wirnika obraca się dookoła osi symetrii stojana. Nieosiowość statyczna polega na tym, że oś symetrii wirnika jest przesunięta względem osi symetrii stojana o stały kąt i odległość - rys.2. Uszkodzenia tego typu powodują nierównomierność szczeliny



Rys. 2. Nieosiowość dynamiczna a) i statyczna b)
Fig. 2. Dynamic a) and static b) misalignment

powietrznej pomiędzy wirnikiem a stojanem. Nierównomierność ta w przypadku a) obraca się wraz z wirnikiem. W wyniku tego, w szczególności, indukcyjności wzajemne pomiędzy uzwojeniami stojana i wirnika zmieniają się cyklicznie, zgodnie z ruchem wirnika. Zamodelowano to wprowadzając do macierzy indukcyjności wzajemnych stojan – wirnik i wirnik – stojan trzy różne wartości indukcyjności wzajemnych. Przy czym dla silnika nieuszkodzonego $L_m = L_1 = L_2 = L_3$.

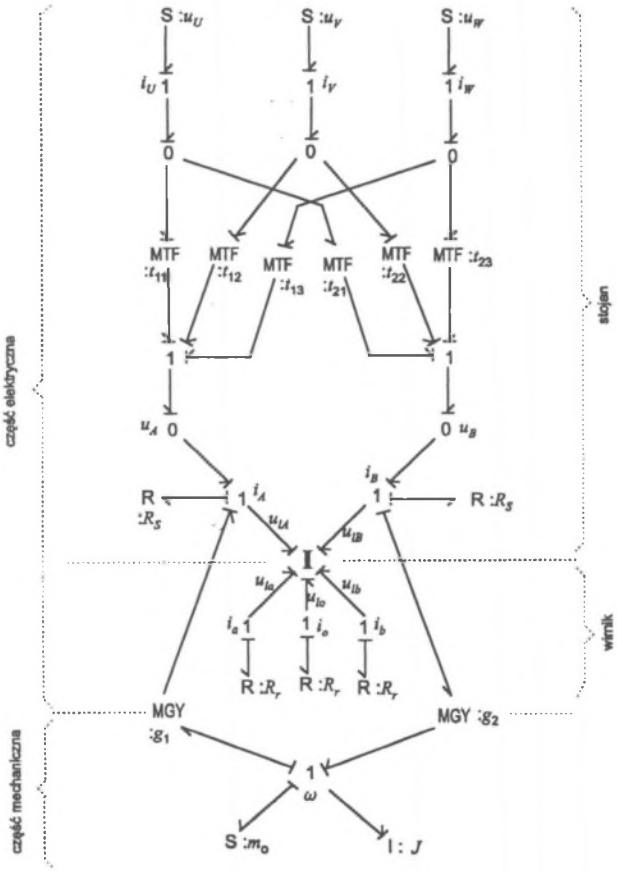
W celu uproszczenia modelu i ułatwienia analizy wykorzystano transformację Parka lub Clark – Stanley'a (w zależności od typu uszkodzenia). Przykładowy model uszkodzonego silnika w postaci grafu wiązań przedstawiono na rys. 3, gdzie zachodzą zależności:

$$\{t_{ij}\} = \sqrt{2/3}\begin{bmatrix} \cos[\gamma(t)] & \cos[\gamma(t)-2\pi/3] & \cos[\gamma(t)+2\pi/3] \\ -\sin[\gamma(t)] & -\sin[\gamma(t)-2\pi/3] & -\sin[\gamma(t)+2\pi/3] \end{bmatrix},$$

$$g_1 = \frac{1}{2}i_B(3L_S) + \frac{\sqrt{3}}{4}i_a(L_3 - L_2) + \frac{3}{4}i_b(L_2 + L_3) + \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}i_o(L_2 - L_3),$$

$$g_2 = \frac{1}{2}i_A(3L_S) + \frac{1}{4}i_a(4L_1 + L_2 + L_3) + \frac{\sqrt{3}}{4}i_b(L_3 - L_2) + \frac{1}{2\sqrt{2}}i_o(2L_1 - L_2 - L_3),$$

$$\begin{bmatrix} u_{lA} \\ u_{lB} \\ u_{la} \\ u_{lb} \\ u_{lo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_S & 0 & 0 & \frac{1}{4}(4L_1+L_2+L_3) & \frac{\sqrt{3}}{4}(L_3-L_2) \\ 0 & \frac{3}{2}L_S & 0 & \frac{\sqrt{3}}{4}(L_3-L_2) & \frac{3}{4}(L_2+L_3) \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2\sqrt{2}}(L_1-L_2-L_3) & \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}(L_2-L_3) \\ \frac{1}{4}(4L_1+L_2+L_3) & \frac{\sqrt{3}}{4}(L_3-L_2) & \frac{1}{2\sqrt{2}}(L_1-L_2-L_3) & \frac{3}{2}L_r & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{4}(L_3-L_2) & \frac{3}{4}(L_2+L_3) & \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}(L_2-L_3) & 0 & \frac{3}{2}L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_a \\ i_b \\ i_o \end{bmatrix}$$



Rys.3. Graf wiązań modelu silnika z nieosiowością dynamiczną
Fig. 3. Bond graph of induction motor with dynamic misalignment

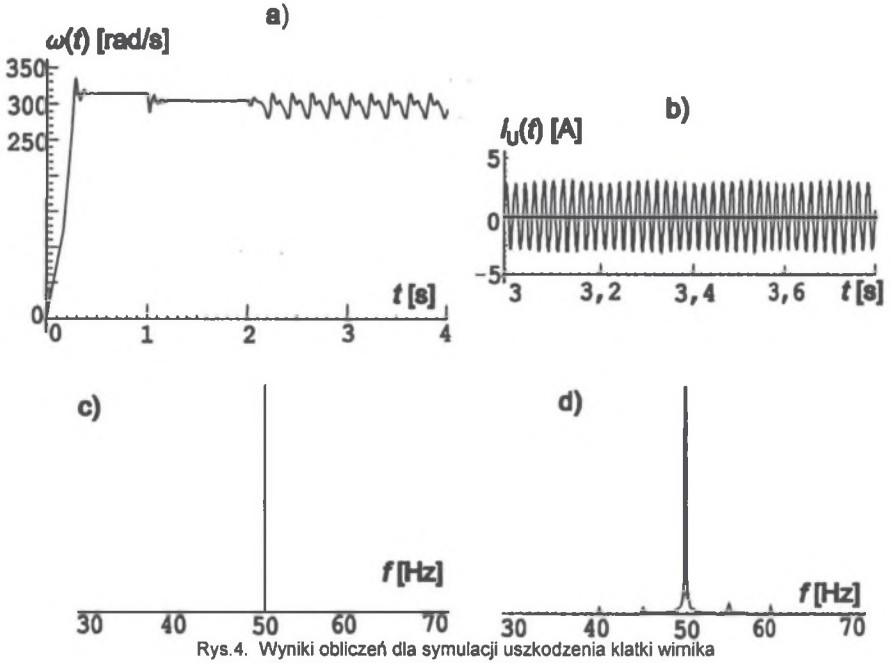
4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Dla badań symulacyjnych przyjęto następujące parametry silnika:

$$R_s = 10\Omega,\ R_r = 10\Omega,\ L_s = 0.4\text{H},\ L_r = 0.3\text{H},\ L_m = 0.2\text{H},\ M_o = 1\text{Nm},\ J = 0.0005\ \text{kgm}^2.$$

Odpowiadają one silnikowi o mocy $P_n = 1.1$ kW .

Wyniki uzyskane w przypadku symulacji uszkodzenia klatki wirnika ($R_{r1} = 1000\Omega$) prezentuje rys. 4. Rysunek 4a przedstawia przebieg prędkości kątowej wirnika. Po rozruchu (w chwili t = 0) po upływie jednej sekundy zostało włączone obciążenie. Po kolejnej sekundzie wprowadzono symulowane uszkodzenie – przebieg prędkości zostaje zmodulowany. Przebieg zgadza się z wynikami uzyskiwanymi w badaniach modelowych innych badaczy [4]. Rysunek 4b przedstawia przebieg prądu stojana w stanie ustalonym po zaistnieniu uszkodzenia. Widmo tego sygnału pokazuje rys. 4d, natomiast rys. 4c przedstawia widmo prądu przed wprowadzeniem uszkodzenia. Widmo zmienia się w sposób zbliżony do wyników uzyskiwanych z eksperymentu [5].

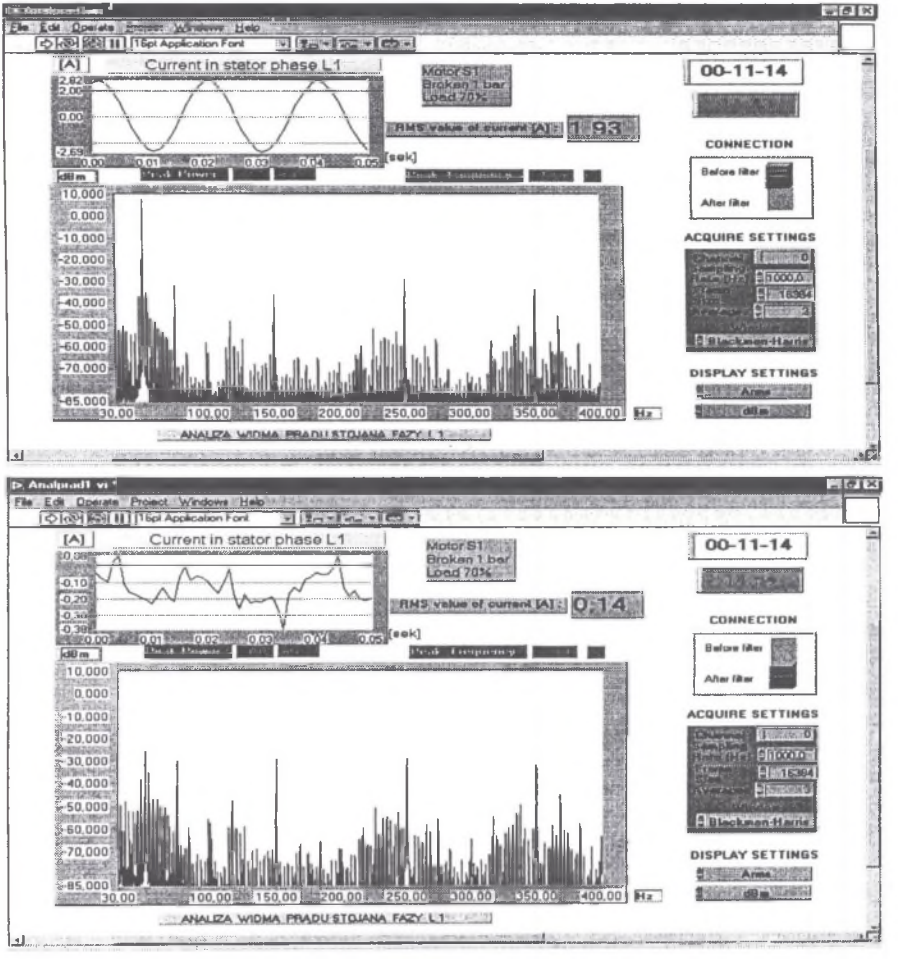


Rys.4. Wyniki obliczeń dla symulacji uszkodzenia klatki wirnika
Fig. 4. Results of calculations for broken bar simulation

5. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W trakcie realizacji jest system diagnostyczny, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 5.

Rys. 5. Schemat blokowy sytemu diagnostycznego
Fig. 5. Block diagram of the diagnostic system



Rys. 6. Widma otrzymane z analizatora przed filtrem (górne okno) i za filtrem (dolne okno)
Fig. 6. Spectra from the analyzer before (upper window) and after (lower window) the filter

Do pomiaru prądu wykorzystano przetworniki typu LEM.

Według statystyk podawanych przez różnych autorów uszkodzenia łożysk stanowią 50 – 90% wszystkich uszkodzeń silników indukcyjnych. Do oceny stanu łożysk silnika niezbędny jest pomiar składowych widma, które mają na ogół bardzo małe amplitudy w porównaniu ze składową podstawową. W dotychczas stosowanych rozwiązaniach korzysta się np. z obróbki statystycznej wyników [6], aby oszacować wielkość składowych, które są na granicy mierzalności. W prezentowanym rozwiązaniu został zastosowany wąskopasmowy filtr analogowy, który usuwa z analizowanego przebiegu pierwszą harmoniczną. Pozwala to przed wejściem sygnału na analizator podnieść względny poziom składowych widma, które niosą informacje związane z uszkodzeniami łożysk. Rozwiązanie to chronione jest patentem.

Oprogramowanie systemu zostało stworzone w środowisku LabVIEW. Przykładowe wyniki analizy widma prądu dla silnika z uszkodzonym prętem zostały przedstawione na rys. 6. Na rysunku

tym górne okno prezentuje przebieg uzyskany bezpośrednio za przetwornikiem, a dolne okno – za filtrem. W chwili obecnej trwają prace nad stworzeniem systemu automatycznej analizy wyników i opracowywaniem diagnoz.

6. WNIOSKI

Zbudowany model reaguje na wprowadzanie symulowanych uszkodzeń. Wyniki są zgodne z oczekiwanymi na podstawie badań innych autorów i eksperymentu. Oprócz typowych uszkodzeń diagnozowanych poprzez analizę prądu zasilającego (uszkodzenia uzwojeń) reaguje również na inne, jak nieosiowość stojana i wału wirnika. W chwili obecnej model zawiera szereg uproszczeń. Prace nad modelem będą kontynuowane w kierunku takiego zbliżenia go do parametrów obiektu rzeczywistego, aby reagował on poprawnie na wszystkie interesujące nas rodzaje uszkodzeń. Model ten będzie wykorzystany w systemie automatycznej analizy wyników. Równolegle prowadzone są prace nad stanowiskiem pomiarowym. W trakcie sympozjum przedstawione zostaną bieżące wyniki pomiarów i analiz, a także udoskonalony model matematyczny.

LITERATURA

1. Elektromagnetyczne procesy przejściowe w asynchronicznym napędzie elektrycznym. Praca zbiorowa. WNT, Warszawa 1970.
2. Paszek W: Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego. WNT, Warszawa 1989.
3. Orlikowski C.: Structured Modelling in Simulink, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki P.G., Gdańsk, 1999, s. 121-128.
4. Abed A., Baghli L.: Modelling Induction Motors for Diagnostic Purposes, EPE'99 Lausanne, s.1-9.
5. Swędrowski L.,Roskosz R.: Virtual Instruments for Diagnostic Purposes, IMEKO 2000 – XVI World Congress, Wiena Sept.25-28,2000. s. 21-29.
6. Kliman G. i inni: Sensorless, online motor diagnostics. IEEE Computer in Power, April 1997, str 39-43.

Recenzent: Dr hab. inż. Jan Rusek
Profesor Akademii Górniczo - Hutniczej

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 marca 2001 r.

Abstract

The domain of interest of the authors of the paper is diagnostics of induction motors; especially diagnostics by investigations of the motor supply current. The defined faults in the motor are sources of current distortions. The measurement problems result from small values of the components due to faults in comparison to the first harmonic of the supply current. Mathematical models of a motor are necessary for interpretation of diagnostic results. In the paper there is presented a first approach to creation of the model. The model and the results of investigations of its sensitivity defined faults in the motor are presented in the paper. The results of experimental tests are given as well.

Fig. 1 presents the structure and symbols of a three-phase induction machine used as a base for the mathematical model. Also a few base equations (Egs. 1, 2) are given. Certain faults like broken cage bars, dynamic and static misalignment of the motor shaft were introduced into the worked out model. Fig.3 presents the model as a bond graph for a motor with introduced dynamic misalignment of the shaft. Then simulation calculations were made basing on the created models.

For calculations the 1,1 kW motor was chosen. Examples of the simulation results are shown in Fig.4. the worked out model is sensitive to the simulated faults. The results are in accordance with those expected basing on the other authors' investigations and on the experiments. The model is sensitive not only to typical faults diagnosed by the current measurement (broken windings) but also to mechanical faults. At the presented moment model is being simplified and will be further developed. The final version should be sensitive to all faults which can occur in a motor. The model will be used for automatic analysis of signals.

Also a few experimental results are shown in the paper. The diagnostic system is shown in Fig. 5. The motor bearing faults constitute 50 – 90% of all the faults of motors in exploitation (according to the source of statistics). For bearings diagnosis it is necessary to measure the components of spectrum, which have comparatively small values. In the present solutions the statistic methods are used [6]. In the presented solution the notch filter cuts off the first harmonic from the analysed current. This way it is possible to increase the values of small harmonics. The software of the system was created in LabVIEW environment. The results of spectrum analysis with and without the filter are shown in Fig.6. These results were obtained for the motor with a broken bar. At present the system for automatic analysis and diagnosis is under consideration.