

WYKORZYSTANIE METOD WIBRACYJNYCH DO WZORCOWANIA SYSTEMU DIAGNOSTYCZNEGO OPARTEGO NA ANALIZIE PRĄDU ZASILAJĄCEGO SILNIK INDUKCYJNY**

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono sposób oceny trafności diagnoz uzyskiwanych z wykorzystaniem nowej metody badawczej, opracowanej do badania uszkodzeń łożysk w silnikach indukcyjnych. Badana metoda diagnostyczna oparta jest na pomiarze i analizie prądu stojana silnika indukcyjnego. W metodzie tej, dla podwyższenia trafności diagnoz, obliczanie zarówno prędkości kątowej silnika, jak i częstotliwości sieci zasilającej jest wykonywane na podstawie tego samego widma, które dalej jest wykorzystywane do pomiaru składowych harmonicznych charakterystycznych dla uszkodzeń łożysk. Sztucznie uszkodzone łożyska poddawano kwalifikacji pod względem głębokości i rodzaju uszkodzenia, wykorzystując urządzenie pomiarowe zbudowane na podstawie opracowanej metody, również wykonując badania sprawdzonym systemem diagnostyki wibracyjnej. Niektóre wyniki badań łożysk o różnych typach i głębokości uszkodzenia oraz wnioski płynące z tych pomiarów zostały podane w niniejszym artykule.

Słowa kluczowe: diagnostyka wibracyjna, silniki indukcyjne, wzorcowanie, system diagnostyczny, analiza prądu, prąd stojana, widmo

APPLICATION OF VIBRATION METHODS FOR CALIBRATION OF DIAGNOSTIC SYSTEM BASED ON MOTOR CURRENT ANALYSIS

Damage of the bearings is the most frequent cause of squirrel cage induction machines failure. In some applications the current signal is the only potential source of information about the state of the machine, including the state of its bearings. Damage of the raceway or of the rolling element is followed by additional vibrations of the rotor. These vibrations are reflected in spectral composition of the stator currents. The new measuring method and the supply current analysis were elaborated for diagnostic of the motor bearings. In this method it is possible to recognize type of bearing fault, checking the control sum for each type of possible fault. The investigation referring to real objects were performed. The investigations were carried out using motors with bearings having defects caused on purpose. Examples of diagnostic results in case of: a) faultless bearings, b) bearing with damaged outer ring are presented in Figures 2 and 3. Marks from L1 to L20 in the Figures 2 and 4 define loads from idle running (L1) to 75% of rated power (L20). The correctness of distinguishing the type of damage was investigated. The diagnosis was assumed to be correct if it conforms to the defects indicated by the standard system of the vibration diagnostics, of course, when other damages were not detected. Figures 1 and 3 show the vibration testing results. The probability of correct distinguishing the type of damage defined this way is shown in the Figure 4. The average probability of diagnostic correctness determined this way reaches 70%. The probability that the system will identify correctly at least one existing defect is more than 90%. The investigations shows, that for testing new diagnostic method it is not enough to make damage to bearing but also have other reliable diagnostic method. This method defines real state of investigated bearing.

Keywords: induction motors, current measurements, vibration measurements, diagnostics, spectrum

1. WSTĘP

W silniku indukcyjnym mogą się pojawić uszkodzenia elementów mechanicznych takich, jak łożyska, wirnik, wał, lub uszkodzenia elementów układu elektromagnetycznego, np. uszkodzenia uzwojeń stojana, wirnika czy obwodu magnetycznego. Statystyka wskazuje, że w przeważającej części awariom w silniku ulegają łożyska.

W diagnostyce silników indukcyjnych stosowane są metody oparte na różnych podstawach fizycznych – najczęściej są to pomiary wibracji, temperatury, zjawisk akustycznych, prądu oraz strumienia magnetycznego. Na szczególną uwagę zasługuje metoda diagnostyczna, polegająca na

wykorzystaniu pomiarów prądu stojana silnika w stanie ustalonym. Pojawienie się określonych typów uszkodzeń w silniku jest źródłem odkształcenia tego prądu. Poddając przebieg prądu analizie widmowej, uzyskuje się szereg składowych, które związane są z określonymi typami uszkodzeń. Na cele diagnostyki łożysk, w praktyce metoda ta nie jest powszechnie stosowana, ze względu na problemy pomiarowe. Dlatego też opracowano nową metodę badawczą, w której obliczanie zarówno prędkości kątowej silnika, jak i częstotliwości sieci zasilającej, jest wykonywane na podstawie tego samego widma, które dalej jest wykorzystywane do pomiaru składowych harmonicznych dla uszkodzeń łożysk.

* Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Miernictwa Elektrycznego

** Artykuł uzyskał pozytywne recenzje i był prezentowany podczas Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2006 w Krakowie

Opracowanie metody poprzedzone zostało szeregiem badań modelowych i symulacyjnych [1, 2].

Zgodnie z opracowaną metodą zbudowano urządzenie pomiarowe, przeprowadzono badania na celowo uszkodzonych łożyskach i dalej poddano uszkodzenia kwalifikacji pod względem rodzaju i głębokości uszkodzenia.

W przypadku sztucznego wprowadzenia do łożyska uszkodzenia, z reguły w widmie wibracji pojawiają się zarówno składowe odpowiedzialne za wprowadzone uszkodzenie, jak i składowe charakterystyczne dla innych uszkodzeń łożyska. Należy przypuszczać, że wprowadzenie do łożyska jednego uszkodzenia powoduje szybki rozwój uszkodzeń wtórnych. A zatem w takim przypadku również w widmie prądu należy oczekiwać składowych harmonicznych, charakterystycznych dla dwóch (lub trzech) rodzajów uszkodzeń. Tak więc dla badania nowych metod diagnostycznych nie jest wystarczające wprowadzenie do łożyska określonego uszkodzenia, należy jeszcze stale w trakcie badań kontrolować rozwój ewentualnych uszkodzeń wtórnych za pomocą innego, sprawdzonego systemu diagnostycznego. W celu potwierdzenia powyższych wniosków wykonane zostały badania eksperymentalne, w których jako układ odniesienia dla badanej metody wykorzystano system diagnostyki wibracyjnej DREAM. Wyniki tych badań oraz płynące z nich wnioski zostaną zaprezentowane w dalszej części artykułu.

2. APARATURA POMIAROWA

System diagnostyki wibracyjnej DREAM umożliwia diagnostykę szeregu maszyn wirujących, a w tym: łożysk tocznych, łożysk ślizgowych, wentylatorów, pomp, przekładni zębatych oraz systemów elektromechanicznych maszyn elektrycznych.

System ten składa się analizatora – kolektora danych DC11 wraz z czujnikiem drgań oraz z oprogramowania DREAM do komputera PC. Proces pomiaru polega na zainstalowaniu czujnika drgań na obiekcie badanym, dołączeniu wyjścia czujnika do wejścia kolektora danych, pomiarze i rejestracji widma wibracji w kolektorze. W dalszej części badania zarejestrowane widmo zostaje przeniesione do komputera PC za pomocą interfejsu RS232 i przeanalizowane z wykorzystaniem programu DREAM.

Podstawowe dane systemu pomiarowego:

- zakres częstotliwości: $0,02 \div 25600$ Hz,
- zakres napięć wejściowych: $1 \mu V \div 3$ V,
- nastawiana liczba prążków w widmach: 400, 800, 1600.

W zakresie diagnostyki łożysk system umożliwia:

- obliczanie i prezentację widma drgań badanego obiektu,
- analizę przebiegów czasowych (tryb oscyloskopu),
- pomiar prędkości obrotowej i jej widma,
- obliczanie częstotliwości charakterystycznych wibracji dla określonych rodzajów uszkodzeń łożyska (parametry geometryczne łożyska system pobiera z własnej bazy danych lub są one wprowadzane z zewnątrz),

- prezentację widm ze wskazaniem składowych wibracji, które przekraczają założony poziom,
- podawanie diagnozy łożyska ze wskazaniem na rodzaj i głębokość uszkodzenia,
- podawanie prognozy bezawaryjnej pracy łożyska.

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badania przeprowadzane były na silnikach indukcyjnych typu STg80X-4C o parametrach:

- $P_n = 1,1$ kW,
- $U_n = 380$ V,
- $n_n = 1400$ obr./min,
- $I_n = 2,9$ A,
- liczba żłobków stojana: 24,
- liczba żłobków wirnika: 22.

W silnikach tych instalowane są łożyska typu 6204.

Badania przeprowadzone zostały zarówno na silnikach bez uszkodzeń, jak i z celowo uszkodzonymi łożyskami.

Uszkodzenia były wprowadzane osobno do trzech elementów łożyska: pierścienia zewnętrznego, wewnętrznego i elementu tocznego. Dla tych badań opracowano własną technologię wprowadzania uszkodzeń do łożyska. Uszkodzono i przebadano szereg egzemplarzy łożysk typu 6204. Dla porównania badano także egzemplarze nieuszkodzone.

Uszkodzone łożyska poddano kwalifikacji pod względem głębokości uszkodzenia. Sposób oceny był następujący: po wykonaniu uszkodzenia montowano łożysko do silnika i wykonywano badanie systemem DREAM. System kwalifikuje uszkodzenia łożysk do trzech grup uszkodzeń

- 1) silnych,
- 2) średnich,
- 3) słabych.

Stwierdzono, że kwalifikacja zależy w równej mierze zarówno od głębokości, jak i kształtu wykonanego ubytku na elemencie łożyska, a nawet przy pozornie identycznych, wprowadzonych ubytkach, diagnozy DREAM nie są powtarzalne. Taki sam ubytek wykonany na różnych elementach łożyska daje różne oceny zaawansowania uszkodzenia.

Badania te potwierdziły słuszność propozycji podanej we wstępie, że wprowadzając dowolną metodą do łożyska sztuczny ubytek, należy po montażu łożyska do silnika zweryfikować rzeczywistą głębokość uszkodzenia inną sprawdzoną metodą, a także ocenić rozwój uszkodzeń wtórnych. W dotychczasowej literaturze (np. [3]) autorzy poprzestają na ocenie głębokości uszkodzenia na podstawie geometrycznej wielkości wykonanego ubytku.

Przeprowadzono badania łożysk o wprowadzonych trzech rodzajach uszkodzeń, każde z nich na trzech poziomach:

- 1) silnym,
- 2) średnim,
- 3) słabym.

Podane w dalszej części rozdziału przykładowe wyniki diagnoz wykonanych systemem DREAM zawierają:

- zarejestrowane widmo vibracji,
- zestaw zidentyfikowanych składowych przekraczających zadany poziom,
- uszkodzenia wraz z ich głębokością i prawdopodobieństwem rozpoznane przez system.

W nowo opracowanej metodzie diagnostycznej z wykorzystaniem analizy prądu stojana, jako syntetyczny miernik wyniku badania diagnostycznego zaproponowano sumę arytmetyczną („sumę kontrolną SK”) amplitud (wyrażonych w dB) składowych diagnostycznych (która odpowiada iloczynowi amplitud w skali liniowej). Tym samym zostaje wyrównana waga składowych o małych i dużych amplitudach. Oznacza to, że wzrost małej czy dużej składowej, np. dwukrotny, daje ten sam efekt – dwukrotny wzrost sumy kontrolnej. Sposób określania częstotliwości składowych diagnostycznych podano w [2].

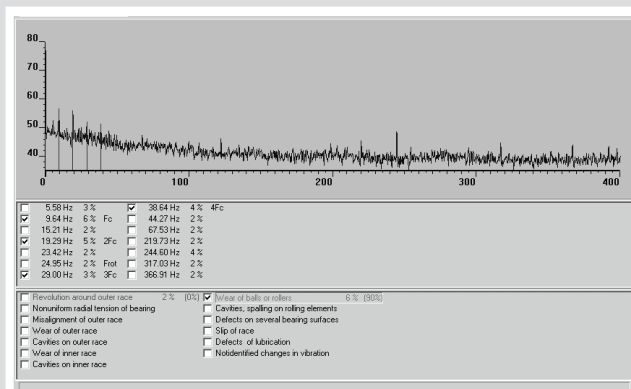
Wprowadzono oznaczenia:

- SKT – suma kontrolna amplitud składowych diagnostycznych, które powinny się pojawić przy uszkodzeniu elementu tocznego (częstotliwości składowych diagnostycznych były obliczane dla vibracji o częstotliwościach wywoływanych przez elementy toczne f_{rol});
- SKK – suma kontrolna amplitud składowych diagnostycznych, które powinny się pojawić przy uszkodzeniu elementu tocznego (częstotliwości składowych diagnostycznych były obliczane dla vibracji o częstotliwościach wywoływanych przez koszyk f_c);
- SK2 – suma kontrolna amplitud składowych diagnostycznych, które powinny się pojawić przy uszkodzeniu elementu tocznego (częstotliwości składowych diagnostycznych były obliczane dla vibracji o częstotliwości równej $f_r - f_c$);
- SKZ – suma kontrolna amplitud składowych diagnostycznych, które powinny się pojawić przy uszkodzeniu zewnętrznego pierścienia (częstotliwości składowych diagnostycznych były obliczane dla vibracji o częstotliwości równej f_{out});
- SKW – suma kontrolna amplitud składowych diagnostycznych, które powinny się pojawić przy uszkodzeniu wewnętrznego pierścienia (częstotliwości składowych diagnostycznych były obliczane dla vibracji o częstotliwości równej f_{in}).

Pierwsze trzy sumy kontrolne związane są z uszkodzeniami elementów tocznych.

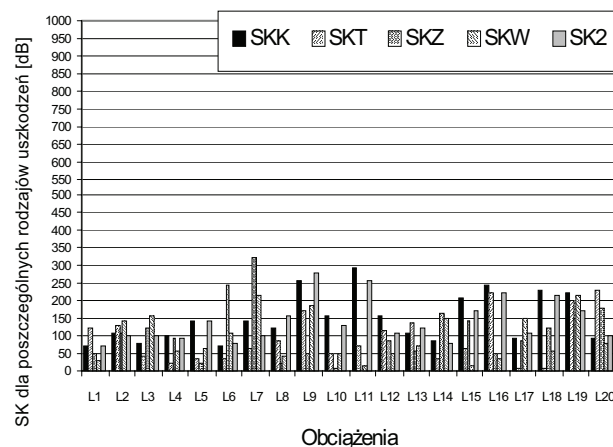
W opracowanej metodzie, w celu rozpoznania rodzaju uszkodzenia, obliczone na podstawie wyników pomiarów wartości sum kontrolnych SKT, SKK, SK2, SKZ i SKW porównuje się z wartością progową równą 250.

Rezultaty rozpoznawania uszkodzeń w kilku badanych łożyskach przedstawiono na rysunkach 1–4.



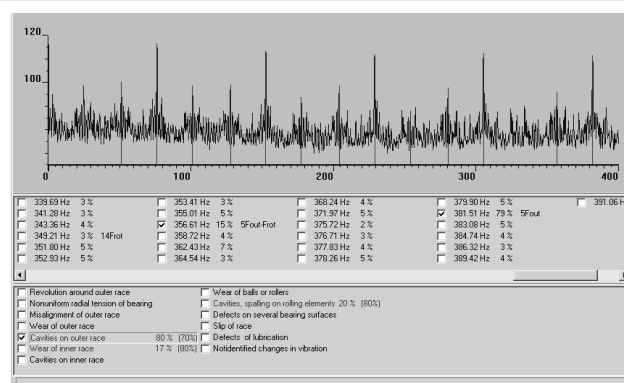
Rys. 1. Wynik badania łożyska bez uszkodzeń systemem DREAM (silnik na biegu jałowym)

Fig. 1. The results of investigations of correct bearing by DREAM system (motor idle running)



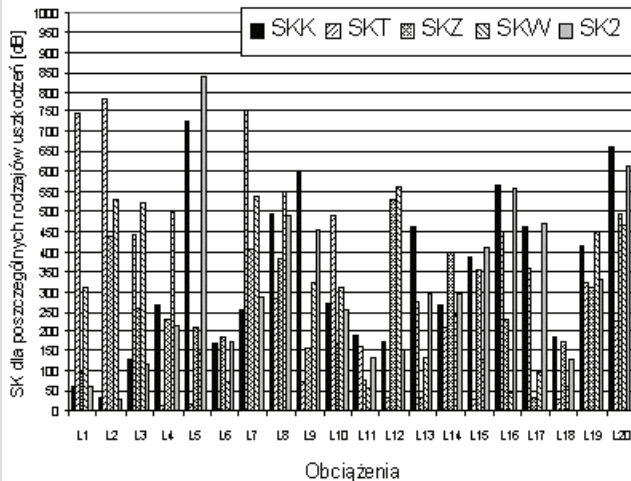
Rys. 2. Wartości sum kontrolnych SKT, SKK, SK2, SKZ i SKW w przypadku łożyska bez uszkodzeń dla obciążeń do biegu jałowego do 75% P_n

Fig. 2. The values of control sums SKT, SKK, SK2, SKZ and SKW for correct bearing (loads from idle running up to 75% of rated power)



Rys. 3. Wynik badania systemem DREAM łożyska z wprowadzonym silnym uszkodzeniem zewnętrznego pierścienia (silnik na biegu jałowym)

Fig. 3. The results of investigations by DREAM system of bearing with deep damage, made on the outer ring (motor idle running)



Rys. 4. Wartości sum kontrolnych SKT, SKK, SK2, SKZ i SKW w przypadku łożyska z wprowadzonym silnym uszkodzeniem zewnętrznego pierścienia w zależności od obciążenia

Fig. 4. The values of control sums SKT, SKK, SK2, SKZ and SKW for bearing with deep damage, made on the outer ring (loads from idle running up to 75% of rated power)

Przekroczenie którejkolwiek z sum tego poziomu świadczy o istnieniu odpowiedniego uszkodzenia. Przekroczenie w tym samym łożysku przez kilka sum kontrolnych poziomu progowego świadczy o istnieniu więcej niż jednego uszkodzenia.

Poziom progowy został określony eksperymentalnie.

Jeśli żadna z sum kontrolnych nie przekroczy wartości progowej wybiera się największą z nich i na tej podstawie rozpoznaje rodzaj uszkodzenia.

4. WNIOSKI

Zaproponowana metoda pomiaru i analizy prądu zasilającego silnik indukcyjny pozwala na rozpoznanie jednego z trzech rodzajów uszkodzeń łożysk:

- 1) uszkodzenie elementu tocznego,
- 2) uszkodzenie pierścienia zewnętrznego,
- 3) uszkodzenie pierścienia wewnętrznego.

Analiza rysunków 1 i 2 wskazuje, że dla łożyska bez uszkodzeń obie metody dają poprawną diagnozę w całym zakresie obciążeń.

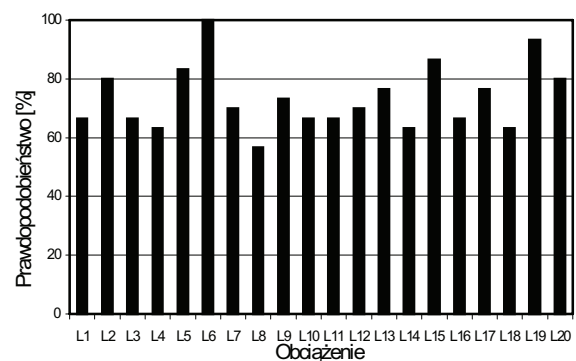
Badanie metodą wibracyjną łożyska (rys. 3), w którym wprowadzono zaawansowane uszkodzenie pierścienia zewnętrznego, daje inny obraz. System diagnostyczny DREAM raportuje uszkodzenie zarówno zewnętrznego jak i wewnętrznego pierścienia a także elementu tocznego. Analogiczny wynik podaje testowana metoda prądowa (rys. 4).

Szereg przeprowadzonych badań tego typu pozwala na przedstawienie następującego ogólnego wniosku. W przypadkach wprowadzenia do łożyska uszkodzenia jednego z pierścieni, z reguły w widmie wibracji pojawiają się zarówno składowe odpowiedzialne za wprowadzone uszkodzenie, jak i składowe, charakterystyczne dla uszkodzeń elementu tocznego, a czasem i drugiego pierścienia.

Należy sądzić, że w badanym typie łożysk uszkodzenie jednego z pierścieni powoduje szybki rozwój wtórnego uszkodzenia elementu tocznego. W takim przypadku również w widmie prądu należy zatem oczekiwać składowych harmonicznych, charakterystycznych dla dwóch (lub trzech) rodzajów uszkodzeń.

Tylko badania porównawcze z wykorzystaniem zaawansowanego systemu diagnostyki wibracyjnej, pozwalają na poprawne wzorcowanie badanego systemu diagnostycznego. Uszkodzenia sztucznie wprowadzane do łożyska generują symptomy diagnostyczne różniące się od tych, które pojawiają się przy uszkodzeniach naturalnych. Trudno jest określić głębokość uszkodzenia. Poza tym już w trakcie badań powstają uszkodzenia wtórne zmieniające obrazy widm wibracji i prądu. W efekcie, jeśli wzorcowanie układu oprzeć tylko na informacjach o rodzaju pierwotnie wprowadzonych uszkodzeń, prawdopodobieństwo poprawności otrzymywanych diagnoz systemem prądowym jest zdecydowanie niższe.

Syntetyczny wynik testowania opracowanej metody prądowej dla identyfikacji rodzaju uszkodzenia, przy systemie wibracyjnym jako metodzie wzorcowej, prezentuje rysunek 5.



Rys. 5. Prawdopodobieństwo trafnego rozpoznania rodzaju uszkodzenia w zależności od obciążenia

Fig. 5. The probability of correct diagnosis for loads from idle running up to 75% of rated power

Jako trafną przyjmowano taką diagnozę, która wskazała na te same uszkodzenia podane przez system DREAM, przy jednoczesnym braku detekcji innych uszkodzeń. Średnie prawdopodobieństwo tak określonej trafności diagnoz wynosi 70%. Prawdopodobieństwo, że system prądowy rozpozna rodzaj co najmniej jednego istniejącego uszkodzenia, wynosi powyżej 90%.

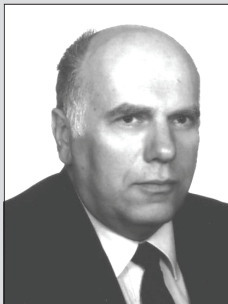
Na podstawie rysunku 5 nie można stwierdzić zależności prawdopodobieństwa trafnego rozpoznania rodzaju uszkodzenia od obciążenia.

Literatura

- [1] Śwędrowski L., Rusek J.: *Model and simulation tests of a squirrel-cage induction motor with oscillation of air gap*. Proc. of 5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Vienna, Austria 7–9 September 2005/ IEEE, Arsenal Research, 131–136

- [2] Swędrowski L.: *Nowa metoda diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego oparta na pomiarze i analizie widmowej prądu zasilającego*. Gdańsk: Wydaw. PG, 2005, 146 (Monografie 54)
- [3] Raison B., Butscher O., Rostaing G., Maroni Claire-Sophie: *Investigations of algorithms for bearing fault detection in induction drives*. Proc. of 2002 Intern. Conf. on Industrial Electronics, Control & Instrumentation, IECON'02 Sevilla

Wpłynęło: 26.09.2006



Leon SWĘDROWSKI

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej w 1972 roku. Pracę doktorską obronił na tym samym Wydziale w roku 1980. Od ukończenia studiów pracuje w Katedrze Miernictwa Elektrycznego Wydziału Elektrycznego (obecnie Wydziału Elektrotechniki i Automatyki) Politechniki Gdańskiej. W roku 2005 uzyskał stopień doktora habilitowanego. Prodziekan

Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG na kadencję 2005–2008. Dziedziny jego zainteresowań to pomiary wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi, diagnostyka techniczna, pomiary o wysokiej dokładności.

e-mail: l.swedrowski@ely.pg.gda.pl



Ariel DZWONKOWSKI

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w 2004 roku. Obecnie jest asystentem w Katedrze Miernictwa Elektrycznego Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Interesuje się diagnostyką i komputerowymi systemami pomiarowymi. Przygotowuje się do wszczęcia przewodu doktorskiego.

e-mail: adzwon@ely.pg.gda.pl