

Ariel DZWONKOWSKI

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI,
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Pomiary mocy chwilowej w diagnostyce łożysk silników indukcyjnych

Mgr inż. Ariel DZWONKOWSKI

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w 2004 roku. Obecnie jest asystentem w Katedrze Metrologii i Systemów Informatycznych Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Przewód doktorski został wszczęty w roku 2007. Obecnie przygotowuje rozprawę doktorską. Interesuje się diagnostyką, komputerowymi systemami pomiarowymi oraz systemami sygnalizacji włamania i napadu. Jest autorem i współautorem szeregu publikacji związanych z diagnostyką łożysk silników indukcyjnych.



e-mail: a.dzwonkowski@ely.pg.gda.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące diagnostyki łożysk z wykorzystaniem metody badawczej, opartej na pomiarze i analizie mocy chwilowej pobieranej przez silnik indukcyjny. Przedstawiono przykładowe wyniki wykonanych pomiarów w oparciu o proponowaną metodę oraz przeprowadzono ich analizę. Na podstawie przeprowadzonej analizy sformułowano wnioski dotyczące możliwości wykorzystania proponowanej metody do diagnostyki łożysk.

Słowa kluczowe: diagnostyka łożysk, pomiary napięcia, pomiary prądu, moc chwilowa, widmo mocy chwilowej, wibracje, silnik indukcyjny.

Instantaneous power measurements in induction motor bearing diagnostics**Abstract**

The paper deals with the issue of bearing diagnostics using the method based on measurements and analysis of a product of instantaneous values of the stator current and supply voltage of induction machines. The introduction of the paper contains general assumptions of the used method and description of the research methodology. The second and third sections present the laboratory stand used for investigations as well as the methodology of the research. The fourth section contains some examples of the measurement results obtained with use of the proposed method and the analysis of these results. The measurements were taken on induction motors. The investigation results for an undamaged machine are shown in Fig. 1, while those for motors with a damaged bearing outer and inner ring are presented in Figs. 2 and 4. The investigation results for a machine with damage of a bearing outer ring for different load torque values are shown in Fig. 6, whereas Figs. 3 and 5 present the vibration measurements of damaged machines. The summary contains the main conclusions concerning the possibility of using the proposed method for bearing diagnostics of induction motors.

Keywords: bearing diagnostics, voltage measurement, current measurements, instantaneous power spectrum, vibration, induction motor.

1. Wstęp

W diagnostyce silników indukcyjnych stosowane są metody oparte na różnych podstawach fizycznych – najczęściej są to pomiary wibracji, zjawisk akustycznych czy prądu. Dostępne na rynku urządzenia do diagnostyki łożysk przeważnie wykorzystują metody wibracyjne, jednak w pewnych przypadkach, np. przy braku bezpośredniego dostępu do silnika metody te nie mogą być stosowane. Alternatywą dla metod wibracyjnych jest wykorzystanie do diagnostyki łożysk wielkości elektrycznych zasilających silnik.

W literaturze [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] opisywane są różne metody diagnostyki łożysk oparte na analizie odkształceń prądu zasilającego silnik indukcyjny. Odkształcenia te mają postać dodatkowych harmonicznych widma, powstających wskutek modulacji przebiegów sygnałami o częstotliwościach charakterystycznych (rozumianych jako częstotliwości drgań mechanicznych, wywołane przez uszkodzone łożyska, które zależą od konstrukcji łożyska

oraz prędkości obrotowej i wskazują na uszkodzenia poszczególnych elementów łożyska) dla danego typu uszkodzenia. Częstotliwości charakterystyczne dla określonych typów uszkodzeń można wyznaczyć na podstawie zależności znanych z literatury [2, 4].

Do badań przyjęto model zjawisk zachodzących w silniku, odwzorowujący wpływ uszkodzeń łożysk na zaburzenia przebiegów prądów i napięć, oparty na założeniu, że każdy kontakt uszkodzonego fragmentu łożyska z innym elementem łożyska powoduje chwilowy wzrost momentu oporowego, a tym samym mocy chwilowej, pobieranej przez silnik [6, 9].

Pomiary wykonywane były na specjalnie przygotowanym stanowisku laboratoryjnym, z którym współpracował wysokiej klasy system pomiarowy. Do wizualizacji i archiwizacji danych pomiarowych opracowano specjalistyczne oprogramowanie w graficznym języku programowania.

Przeprowadzone zostały badania silników z rzeczywistymi uszkodzeniami łożysk. Dla porównania badano także egzemplarze nieuszkodzone.

Analiza wyników badań wykazała, że w widmie mocy chwilowej (rozumianej jako iloczyn wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego silnik) występują dodatkowe składowe, związane z częstotliwościami wibracji generowanych przez uszkodzone łożysko.

2. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze przeznaczone jest do pomiarów diagnostycznych łożysk silników o mocach do 5,0 kW. Konstrukcja stanowiska została podporządkowana głównemu celowi, jakim jest izolacja badanego silnika od drgań otoczenia. Stanowisko składa się z silnika badanego, tłumików wibroakustycznych, umożliwiających odizolowanie badanych maszyn od podstawy, na której zamontowane jest obciążenie, sprzęgła magnetycznego oraz laserowego układu do dokładnego osiowania wałów.

Do pomiarów prądów i napięć wykorzystano układ pomiarowy, składający się z wysokiej klasy bocznika o rezystancji 0,1 Ω i rezystancyjnego dzielnika napięcia. Dzielnik napięcia zbudowany jest z dwóch rezystorów o wartościach rezystancji 20 k Ω i 10 M Ω . Klasa dokładności bocznika wynosi 0,02 a klasy dokładności rezystorów wykorzystanych w dzielniku napięcia wynoszą odpowiednio: 0,05 i 0,02.

Ze stanowiskiem laboratoryjnym współpracuje wysokiej klasy system pomiarowy produkcji National Instruments. System ten stanowi kasetę NI PXI 1031, w której zainstalowano dwie karty pomiarowe: PXI 6122 i PXI 4462. Karta PXI 6122 umożliwia jednoczesną akwizycję sygnałów pomiarowych w czterech kanałach z rozdzielczością 16 bitów i częstotliwością próbkowania 500 kHz dla każdego z kanałów. Natomiast karta PXI 4462 charakteryzuje się dużym zakresem dynamiki (118 dB) oraz rozdzielczością wynoszącą 24 bity. Po wykonaniu wstępnych pomiarów do dalszych badań wybrano kartę PXI 4462. System PXI wykorzystany został do pomiarów wartości chwilowych prądów i napięć zasilających badane maszyny. Pomierzone wartości chwilowe prądów i napięć przesyłane były do komputera, gdzie poddane zostały analizie celem określenia składowych widma do wykorzystania w diagnostyce łożysk. Do wizualizacji odczytanych danych wykorzystano program opracowany w środowisku programowania LabVIEW, który umożliwia prezentację wyników pomiarów, określa prędkość obrotową wirnika na podstawie składowej żłobkowej oraz dokonuje filtracji falkowej i analizy widmowej otrzymanych danych pomiarowych. Opracowana aplikacja umożliwia również archiwizację danych pomiarowych.

3. Badania diagnostyczne łożysk silników indukcyjnych

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

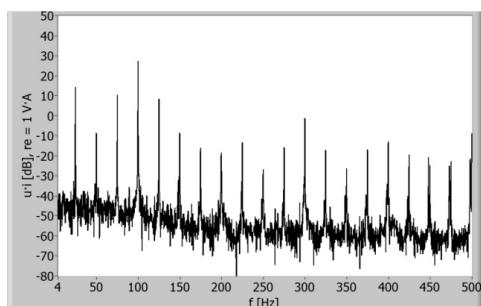
Uszkodzenia zostały wprowadzane osobno do dwóch elementów łożyska: pierścienia zewnętrznego i pierścienia wewnętrznego. Do celów badań diagnostycznych opracowano własną technologię wprowadzania uszkodzeń do łożyska.

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. Zatem w takim przypadku również w widmie mocy chwilowej mogą pojawić się składowe harmoniczne, charakterystyczne dla dwóch (lub więcej) rodzajów uszkodzeń. Dlatego też konieczne jest kontrolowanie powstawania i rozwoju uszkodzeń wtórnych za pomocą innego, sprawdzonego systemu diagnostycznego.

Jako metodę porównawczą przyjęto metodę opartą na pomiarach wibracji. Wykorzystany w badaniach system diagnostyki wibracyjnej DREAM 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 i rejestracji wibracji w kolektorze. Następnie dane pomiarowe przesyłane są do komputera PC, gdzie poddawane są analizie.

Uszkodzono i przebadano szereg egzemplarzy łożysk typu 6204 o różnych głębokościach wprowadzonych defektów. Dla porównania badano także egzemplarze nieuszkodzone.

Na rysunku 1 przedstawiono widmo mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego.

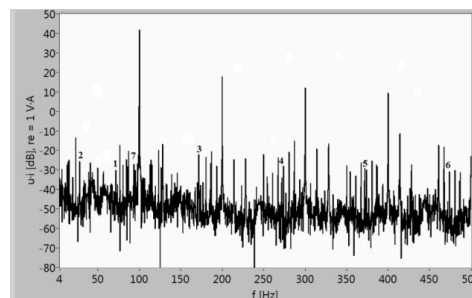


Rys. 1. Widmo mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego
Fig. 1. Spectrum of instantaneous power for undamaged motor

Wszystkie składowe w widmie przedstawionym na rysunku wynikają z normalnej pracy maszyny i są zgodne z oczekiwaniami. Składowe te związane są z obecnością harmonicznych napięcia zasilającego silnik i częstotliwości związanej z prędkością rotacji wirnika. Również system diagnostyki wibracyjnej DREAM nie raportował żadnych uszkodzeń łożysk badanego silnika.

Na rysunku 2 przedstawiono widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzeniem pierścienia zewnętrznego łożyska o średniej głębokości uszkodzenia, przy obciążeniu równym 100% I_N . W otrzymanych wynikach występuje oczekiwana składowa o częstotliwości charakterystycznej $f_H = 72,9$ Hz (prążek numer 1). Ponadto w widmie obecne są częstotliwości będące rezultatem modulacji składowych, występujących w widmie mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną. Są to prążki, których częstotliwości wynoszą 27,1 Hz, 172,9 Hz, 272,9 Hz, 372,9 Hz, 472,9 Hz (prążki odpowiednio: 2, 3, 4, 5, 6). Składowe 27,1 Hz oraz 172,9 Hz są kombinacją częstotliwości: $2f - f_H$ i $2f + f_H$ przy czym f jest częstotliwością napięcia zasilającego. Prążek o częstotliwości 272,9 Hz to kombinacja częstotliwości $4f + f_H$. Natomiast składowa o częstotliwości 372,9 Hz to

kombinacja częstotliwości $6f + f_H$ a składowa 472,9 Hz to kombinacja częstotliwości $8f + f_H$.

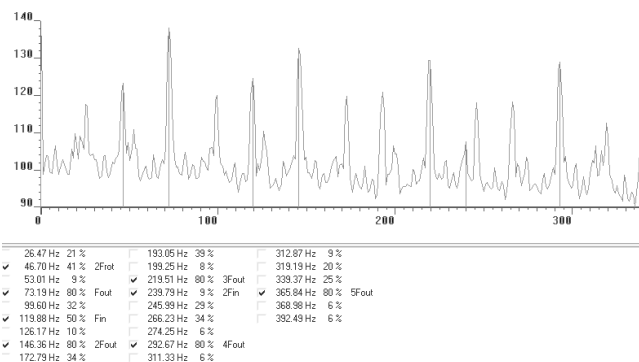


Rys. 2. Widmo mocy chwilowej dla silnika indukcyjnego z uszkodzoną bieżnią zewnętrzną łożyska przy obciążeniu równym 100% I_N

Fig. 2. Spectrum of instantaneous power for induction motor with damaged outer bearing race loaded with 100% I_N

W widmie pojawiają się również produkty modulacji składowej związanej z prędkością rotacji wirnika składową o częstotliwości charakterystycznej f_H (prążek 7).

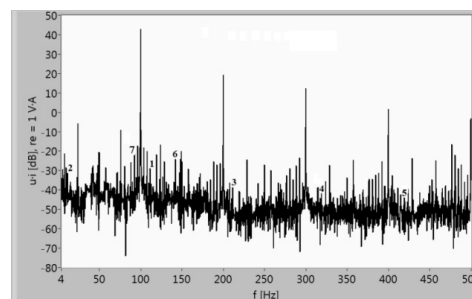
Również system diagnostyki wibracyjnej DREAM sygnalizował uszkodzenia pierścienia zewnętrznego łożyska. System ten podawał częstotliwość uszkodzenia 73,19 Hz (rysunek 3).



Rys. 3. Widmo wibracji dla silnika indukcyjnego z uszkodzoną bieżnią zewnętrzną łożyska przy obciążeniu równym 100% I_N

Fig. 3. Spectrum of vibrations for induction motor with damaged outer bearing race loaded with 100% I_N

Rysunek 4 przedstawia widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzeniem pierścienia wewnętrznego łożyska o dużym stopniu zaawansowania uszkodzenia.



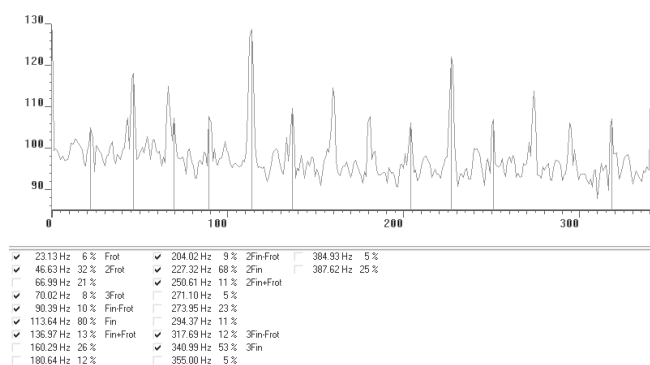
Rys. 4. Widmo mocy chwilowej dla silnika indukcyjnego z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną łożyska przy obciążeniu równym 100% I_N

Fig. 4. Spectrum of instantaneous power for induction motor with damaged inner bearing race loaded with 100% I_N

Badania wykonywano dla silnika indukcyjnego przy znamionowym obciążeniu. Podobnie jak w przypadku uszkodzenia pierścienia zewnętrznego łożyska w widmie mocy chwilowej występuje oczekiwana składowa o częstotliwości charakterystycznej

$f_H=114,9$ Hz (prążek numer 1). W widmie obecne są również częstotliwości będące rezultatem modulacji składowych, występujących w widmie mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną dla uszkodzenia pierścienia wewnętrznego. Są to prążki o częstotliwościach 14,9 Hz, 214,9 Hz, 314,9 Hz i 414,1 Hz (odpowiednio prążki numer 1, 2, 4, 5, 6). Składowa 90,6 Hz (prążek 7) jest produktem modulacji składowych związanych z prędkością rotacji wirnika składową charakterystyczną f_H .

Również system diagnostyki wibracyjnej DREAM sygnalizował uszkodzenie pierścienia wewnętrznego łożyska, podając częstotliwość charakterystyczną dla tego typu uszkodzenia 113,64 Hz (rysunek 5).

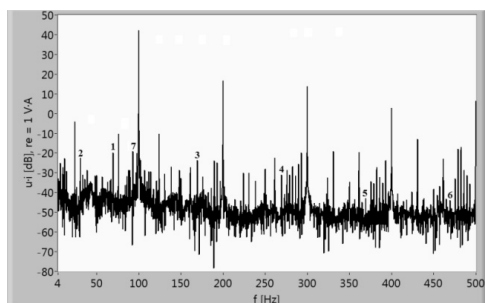


Rys. 5. Widmo wibracji dla silnika indukcyjnego z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną łożyska przy obciążeniu równym 100% I_n

Fig. 5. Spectrum of vibrations for induction motor with damaged inner bearing race with load equal to 100% I_n

Dla sprawdzenia wpływu obciążenia na składowe, występujące w widmie mocy chwilowej, przeprowadzono badania symulacyjne dla innych wartości momentu obciążenia.

Na rysunku 6 zaprezentowano widmo mocy chwilowej, uzyskane z pomiarów dla silnika z uszkodzonym pierścieniem zewnętrznym łożyska o średniej głębokości uszkodzenia, przy obciążeniu równym 50% prądu znamionowego.



Rys. 6. Widmo mocy chwilowej dla silnika indukcyjnego z uszkodzoną bieżnią zewnętrzną łożyska przy obciążeniu równym 50% I_n

Fig. 6. Spectrum of vibrations for induction motor with damaged inner bearing race with load equal to 50% I_n

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że niezależnie od wartości momentu obciążenia w widmie mocy chwilowej występuje zarówno składowa charakterystyczna dla uszkodzenia (prążek numer 1) jak również składowe, które są wynikiem modulacji częstotliwości obecnych w widmie silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną (prążki 2, 3, 4, 5, 6, 7). Zmianie ulegają jedynie amplitudy poszczególnych harmonicznych.

W przypadku badań dla innych wartości obciążenia silnika diagnozy uzyskane z systemu DREAM również potwierdzały występowanie uszkodzenia bieżni zewnętrznej łożyska.

4. Wnioski

Przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu uszkodzeń łożysk na iloczyn wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny.

Badanymi maszynami były silniki STg80X-4C, w których zamontowano łożyska typu 6204. Do badań przygotowano szereg łożysk o różnych głębokościach wprowadzonych defektów.

Przeprowadzone badania silników indukcyjnych, w których zamontowano uszkodzone łożyska potwierdziły, iż w widmie mocy chwilowej pojawiają się dodatkowe składowe harmoniczne, związane z częstotliwością charakterystyczną dla określonego typu uszkodzenia łożyska. Częstotliwości te są produktem modulacji składowych widma występujących w silniku bez uszkodzeń składowymi wibracji pochodzącymi od uszkodzonego łożyska.

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły również fakt, iż w widmie mocy chwilowej w sposób jawny występuje składowa o częstotliwości zaburzenia pochodzącego od uszkodzonego łożyska. Analiza otrzymanych wyników badań eksperymentalnych silników indukcyjnych potwierdziła, iż zjawisko to występuje niezależnie od typu oraz głębokości uszkodzenia łożyska. Wykorzystany, w celu sprawdzenia metody opartej na pomiarach i analizie mocy chwilowej, system diagnostyki wibracyjnej w każdym przypadku podawał wyniki zbieżne z wynikami uzyskanymi z omawianą metodą.

Zatem, zdaniem autora, proponowana metoda analizy widma mocy chwilowej może znaleźć zastosowanie w diagnostyce uszkodzeń łożysk tocznych silników indukcyjnych i pozwoli na zwiększenie precyzji oceny stanu łożyska w porównaniu z klasycznymi metodami prądowymi.

Uzyskane wyniki badań poddane zostaną dalszym analizom w celu opracowania zaawansowanego algorytmu wnioskowania diagnostycznego.

Badania zostały sfinansowane z grantu promotorskiego nr N N510 329137.

5. Literatura

- [1] Adabi J., Zare F., Ledwich G., Ghosh A., Lorenz R. D.: Bearing Damage Analysis by Calculation of Capacitive Coupling between Inner and Outer Races of a Ball Bearing. 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008), pages 903-907.
- [2] Blödt M., Granjon P., Raison B., Rostaing G.: Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, no. 4, April 2008.
- [3] Stack J.R., Habetler T. G., Harley R. G.: Bearing fault detection via autoregressive stator current modeling. IEEE, vol.2, Salt Lake City, 2003.
- [4] Swędrowski L.: Nowa metoda diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego, oparta na pomiarze i analizie widmowej prądu zasilającego. Wydawnictwo PG, Gdańsk 2005.
- [5] Rusek J., Swędrowski L.: Wpływ uszkodzenia łożyska na spectrum prądu silnika indukcyjnego. XXXIX SME, Gdańsk 2003.
- [6] Legowski S.F., Sadrul Ula H.M., Trzynadlowski A.M: Instantaneous Power as a Medium for the Signature Analysis of Induction Motors. IEEE, Transactions on Industry Applications, vol.32, no.4, 1996.
- [7] Obaid R.R., Habetler T.G., Stack J.R.: Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors, IEEE International SDEMPED, Atlanta, USA, 2003.
- [8] Trajin B., Regnier J., Faucher J.: Bearing fault indicator in induction machine using stator current spectral analysis. Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008. 4th IET Conference on 2-4 April 2008 Page(s): 592 – 596.
- [9] Dzwonkowski A., Swędrowski L.: Badania symulacyjne wpływu uszkodzeń łożysk silnika indukcyjnego na przebieg chwilowych wartości prądu i napięcia, Pomiar Automatyka Kontrola. - Vol. 53, nr 4 (2007), s. 41-43.