

II Sympozjum

AKTUALNE PROBLEMY W METROLOGII' 2013

Katedra Metrologii i Systemów Informacyjnych Politechniki Gdańskiej

DIAGNOSTYKA ŁOŻYSK SILNIKA INDUKCYJNEGO PRZY UŻYCIU POMIARU PRĄDU ZASILAJĄCEGO ORAZ WIBRACJI

Tomasz CISZEWSKI

Miejsce pracy: Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
tel. :58 347 2945 e-mail: t.ciszewski@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawione zostały wyniki badań diagnostycznych łożysk silnika indukcyjnego z zastosowaniem metody pomiaru prądu zasilającego oraz wibracji. Poruszone zostały problemy dotyczące poszukiwania nowej metody opartej na pomiarze i analizie prądu, która w znacznym stopniu ułatwiłaby szybkie i sprawne znalezienie uszkodzenia w maszynie, bez konieczności bezpośredniego dostępu do badanego urządzenia. Zaprezentowano rezultaty badań eksperymentalnych dla łożyska nieuszkodzonego oraz dla łożyska z celowo wprowadzonym uszkodzeniem. Pomiar metodą wibracyjną i prądową wykonano na tym samym obiekcie w tym samym czasie. Przedstawiony został algorytm przetwarzania sygnału pochodzącego z pomiarów prądu oraz wyniki jego działania. Przeprowadzone badania wykazały, że możliwe jest wykrycie uszkodzenia oraz jego rodzaju metodą prądową.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka łożysk, silnik indukcyjny, uszkodzenia łożysk.

## 1. WPROWADZENIE

Normalna eksploatacja maszyn elektrycznych niesie ze sobą ryzyko zużycia lub uszkodzenia niektórych części układu napędowego. Jednym z elementów najczęściej ulegającym awarii są łożyska. Niestety czasem zdarza się, że uszkodzenia pojawiają się przedwcześnie i nie da się jednoznacznie określić czasu bezpiecznej pracy silnika bez przeprowadzania badań diagnostycznych. W silnikach indukcyjnych ponad 40% wszystkich uszkodzeń to uszkodzenia łożysk. Dlatego diagnostyka tego elementu jest szczególnie ważna z punktu widzenia bezawaryjnej pracy układu napędowego.

Diagnostyka łożysk metodami wibracyjnymi została już dobrze opracowana i jest szeroko stosowana w przemyśle. Korzystanie z tego sposobu nie jest jednak możliwe lub jest poważnie utrudnione w obiektach trudno dostępnych, gdyż wymaga ona instalacji dodatkowych czujników do pomiaru drgań. Wszędzie tam znalazłaby zastosowanie metoda oparta na pomiarze i analizie prądu zasilającego silnik. Wykonywanie pomiarów prądu do celów diagnostycznych nie musi odbywać się bezpośrednio przy obiekcie badanym, wystarczy dostęp do przewodu zasilającego silnik, który zazwyczaj dość łatwo uzyskać w rozdzielni z której zasilana jest maszyna.

Uszkodzenie któregośkolwiek z elementów łożyska powoduje promieniowy ruch między wirnikiem a stojanem maszyny. Częstotliwość tego ruchu jest zależna od budowy

łożyska, od tego który element jest uszkodzony oraz od aktualnej prędkości obrotowej. Na podstawie amplitudy wspomnianych oscylacji można natomiast określić stopień uszkodzenia. Charakterystyczne częstotliwości drgań od uszkodzonego łożyska dają się dość łatwo zidentyfikować w widmie wibracji zmierzonych w węźle łożyskowym. W widmie prądu zmiany generowane przez uszkodzone łożysko nie są niestety tak łatwe do rozpoznania, co otwiera dość szerokie pole do badań głównie nad algorytmami diagnostycznymi.

Artykuł opisuje algorytm wyszukujący składowe prądu generowane przez uszkodzone łożysko. Prezentowane są wyniki badań dla łożyska z celowo wprowadzonym uszkodzeniem oraz dla łożyska bez uszkodzeń. Omawiane rezultaty zostały uzyskane poprzez analizę jednocześnie wykonanych pomiarów prądu zasilającego silnik oraz wibracji w węźle łożyskowym. Pomiar wibracji służy głównie do potwierdzenia stanu łożyska, ponieważ mogą pojawiać się uszkodzenia wtórne powstałe podczas badań.

Prezentowane badania zostały wykonane dla silnika STg 80X – 4C przy zasilaniu sieciowym na biegu jałowym. Podczas badań przeprowadzano wymiany łożysk. Wprowadzone uszkodzenie bieżni zewnętrznej ma charakter rysy wzdłuż kierunku toczenia o wymiarach (długość x szerokość x głębokość) 6 x 1 x 1 mm.

## 2. DIAGNOSTYKA WIBRACYJNA

Diagnostyka wibracyjna opiera się na pomiarze wibracji w węźle łożyskowym oraz analizie widma zmierzonych drgań. Częstotliwości charakterystyczne dla uszkodzeń poszczególnych elementów łożyska zależą od jego budowy, wymiarów geometrycznych oraz od aktualnej prędkości obrotowej wału. Sposób obliczania częstotliwości tych składowych przedstawiono wzorami 1 – 4 [1].

$$f_{out} = \frac{1}{2} \frac{n}{60} \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \alpha \right) N_b \quad (1)$$

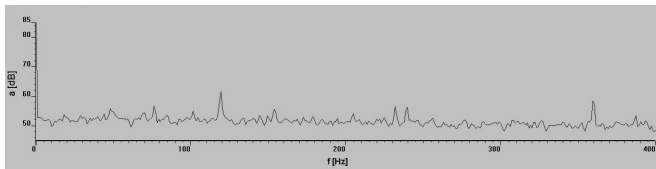
$$f_{in} = \frac{1}{2} \frac{n}{60} \left( 1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \alpha \right) N_b \quad (2)$$

$$f_c = \frac{1}{2} \frac{n}{60} \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \alpha \right) \quad (3)$$

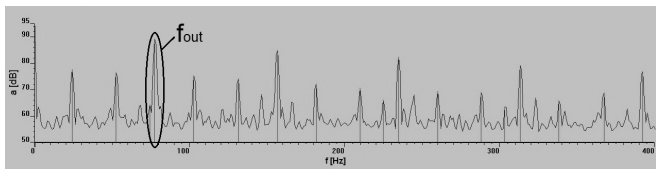
$$f_{rot} = \frac{1}{2} \frac{n}{60} \frac{P_d}{B_d} \left( 1 - \frac{B_d^2}{P_d^2} \cos^2 \alpha \right) \quad (4)$$

gdzie:  $f_{out}$  – częstotliwość przetaczania elementów tocnych po zewnętrznym pierścieniu,  
 $f_{in}$  – częstotliwość przetaczania elementów tocnych po wewnętrznym pierścieniu,  
 $f_c$  – częstotliwość koszyka,  
 $f_{rot}$  – częstotliwość elementów tocnych,  
 $n$  – prędkość obrotowa [obr./min],  
 $N_b$  – liczba kulek lub rolek,  
 $B_d$  – średnica kulki lub rolki,  
 $P_d$  – średnica podziałowa łożyska,  
 $\alpha$  – kąt naporu.

Drgania zostały zmierzone przy pomocy systemu diagnostyki wibracyjnej „DREAM”. Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono wyniki badań dla łożyska nieuszkodzonego oraz z uszkodzoną bieżnią zewnętrzną.



Rys. 1. Widmo drgań dla łożyska bez uszkodzeń



Rys. 2. Widmo drgań dla łożyska z uszkodzoną bieżnią zewnętrzną

Porównując oba wykresy można zauważyć, że poziom zarejestrowanych drgań dla łożyska nieuszkodzonego jest zdecydowanie niższy. W widmie łożyska uszkodzonego występują wysokie prążki, przy częstotliwościach charakterystycznych dla uszkodzenia bieżni zewnętrznej. Składową o częstotliwości  $f_{out}$  oznaczono elipsą, pozostałe składowe oznaczone pionowymi liniami potwierdzają wystąpienie uszkodzenia (m.in. kolejne krotności  $f_{out}$ ).

### 3. DIAGNOSTYKA METODĄ PRĄDOWĄ

Ze względu na zjawiska fizyczne zachodzące w maszynie indukcyjnej, składowe o częstotliwościach charakterystycznych nie występują w widmie prądu w sposób jawny co znacznie utrudnia diagnostykę metodą prądową.

Zakładamy, że każda wada łożyska powoduje promieniowy ruch pomiędzy wirnikiem a stojanem maszyny. Oscylacje osi wirnika prowadzą do zmiany szczeliny powietrznej maszyny. Dzięki temu w widmie prądu można zaobserwować składowe niosące informację o uszkodzeniach. Zmiany w szczelinie powietrznej powodują niewielkie różnice w prądzie [2]. Chcąc je zarejestrować konieczne jest zastosowanie bardzo czułego

układu pomiarowego. Wymaganie to jest jednak ograniczone parametrami urządzeń pomiarowych. W tej sytuacji niezbędny jest przetwornik A/C o bardzo dużej rozdzielczości i częstotliwości próbkowania oraz przetwornik A/A o bardzo niskim poziomie szumów własnych, szerzej opisany w [3]. Na podstawie badań [4, 5] oszacowano, że poziom szumów własnych układu pomiarowego nie powinien przewyższać -90 dB w stosunku do największych składowych w widmie prądu.

W badaniach wykorzystano pomiary prądu silnika wykonane równocześnie w 3 fazach. Zastosowany układ rejestrujący prąd podczas jednego cyklu dokonuje ośmiu kolejno następujących po sobie pomiarów, z których każdy trwa 8 s. Zastosowana częstotliwość próbkowania wynosi ponad 65 kHz. Przebiegi otrzymane z pomiarów poddano transformacji Fouriera przy użyciu okna wygładzającego Hanninga. Kolejnym etapem przetwarzania sygnału jest kilkukrotna modyfikacja widma. Pierwsza z nich polega na uśrednieniu widma z 3 faz. W ten sposób uzyskano 8 widm, dzięki czemu można było dokonać kolejnych 8 uśrednień. Następnie widmo zostało zlogarytmowane względem najwyższej składowej. W celu umożliwienia właściwej analizy, należało wyeliminować z widma składowe o niskich amplitudach występujące losowo. Amplitudy tych składowych są jednocześnie na tyle duże, że utrudniają odczyt i ocenę widma. Aby usunąć niechciane składowe dla każdego punktu wyznaczono średnią w otoczeniu tego punktu. Z obliczeń wykluczono wszystkie składowe których stromość narastania lub opadania jest wyższa niż 12 dB/Hz. Tak obliczona średnia została odjęta od widma dzięki czemu uzyskano spektrum łatwiejsze do dalszej obróbki.

Prędkość obrotowa została obliczona w oparciu o częstotliwość zębówką ujawniającą się w widmie. Na tej podstawie możliwe było obliczenie częstotliwości charakterystycznych zgodnie ze wzorami (1)-(4).

W tabeli 1 przedstawiono częstotliwości składowych występujących w widmie prądu silnika [5]. W kolumnie 2 zawarto częstotliwości składowych prądu występujących podczas pracy silnika bez uszkodzeń łożysk. W przypadku uszkodzenia łożyska, w widmie prądu pojawiają się nowe składowe, które są efektem modulacji składowych z kolumny 2 częstotliwością charakterystyczną dla danego uszkodzenia łożyska. Istnienie takiego zjawiska zostało udowodnione na podstawie badań modelowych [2]. Częstotliwości zmodulowanych składowych, które świadczą o uszkodzeniu danego elementu łożyska podano w kolumnie 3 i 4 tabeli 1. W ten sposób otrzymuje się zestaw 64 składowych dla danego uszkodzenia, które następnie poszukiwane są w widmie. Zostają one oznaczone jedynie wtedy, gdy przewyższą wartość 2 dB powyżej średniej w otoczeniu danego punktu.

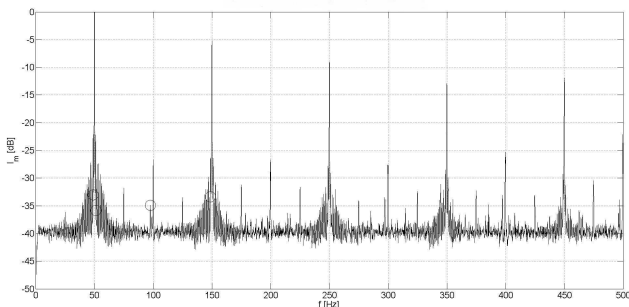
Tabela 1. Częstotliwości składowych prądu silnika [5]

Lp.	Częstotliwość składowej	Częstotliwości składowych wyszukiwanych w widmie prądu	
1	$f_z$	$f_z \pm f_{ch}$	$f_z \pm 2f_{ch}$
2	$3f_z$	$3f_z \pm f_{ch}$	$3f_z \pm 2f_{ch}$
3	$5f_z$	$5f_z \pm f_{ch}$	$5f_z \pm 2f_{ch}$
4	$f_z - f_r$	$(f_z - f_r) \pm f_{ch}$	$(f_z - f_r) \pm 2f_{ch}$
5	$f_z + f_r$	$(f_z + f_r) \pm f_{ch}$	$(f_z + f_r) \pm 2f_{ch}$
6	$f_z - 2f_r$	$(f_z - 2f_r) \pm f_{ch}$	$(f_z - 2f_r) \pm 2f_{ch}$
7	$f_z + 2f_r$	$(f_z + 2f_r) \pm f_{ch}$	$(f_z + 2f_r) \pm 2f_{ch}$
8	$ f_z - 3f_r $	$ f_z - 3f_r  \pm f_{ch}$	$ f_z - 3f_r  \pm 2f_{ch}$
9	$f_z + 3f_r$	$(f_z + 3f_r) \pm f_{ch}$	$(f_z + 3f_r) \pm 2f_{ch}$
10	$3f_z - f_r$	$(3f_z - f_r) \pm f_{ch}$	$(3f_z - f_r) \pm 2f_{ch}$

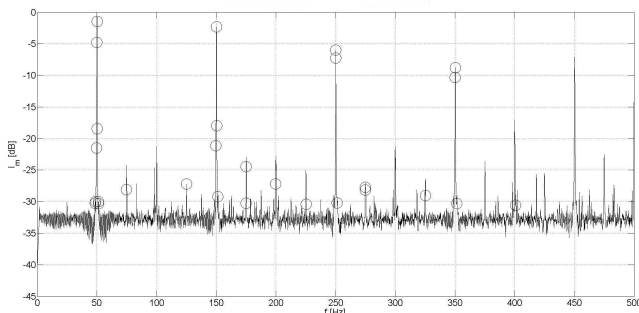
11	$3f_z + f_r$	$(3f_z + f_r) \pm f_{ch}$	$(3f_z + f_r) \pm 2f_{ch}$
12	$3f_z - 2f_r$	$(3f_z - 2f_r) \pm f_{ch}$	$(3f_z - 2f_r) \pm 2f_{ch}$
13	$3f_z + 2f_r$	$(3f_z + 2f_r) \pm f_{ch}$	$(3f_z + 2f_r) \pm 2f_{ch}$
14	$5f_z - f_r$	$(5f_z - f_r) \pm f_{ch}$	$(5f_z - f_r) \pm 2f_{ch}$
15	$5f_z + f_r$	$(5f_z + f_r) \pm f_{ch}$	$(5f_z + f_r) \pm 2f_{ch}$
16	$5f_z - 2f_r$	$(5f_z - 2f_r) \pm f_{ch}$	$(5f_z - 2f_r) \pm 2f_{ch}$

gdzie:  $f_z$  – częstotliwość sieci zasilającej,  $f_r$  – częstotliwość obrotowa,  $f_{ch}$  – częstotliwość wibracji, która jest charakterystyczna dla danego uszkodzenia.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono widmo amplitudowe prądu silnika z łożyskiem nieuszkodzonym i uszkodzonym. W obu przypadkach poszukiwano uszkodzeń bieżni zewnętrznej. Okręgami oznaczono składowe o częstotliwościach charakterystycznych dla uszkodzenia bieżni zewnętrznej zgodnie z kolumną 3 i 4 tabeli 1 gdzie  $f_{ch}$  to  $f_{out}$  (1).



Rys. 3. Widmo amplitudowe prądu silnika z łożyskiem bez uszkodzeń



Rys. 4. Widmo amplitudowe prądu silnika z uszkodzonym łożyskiem

Analizując powyższe wykresy można zauważyć, że w widmie amplitudowym prądu silnika z uszkodzonym łożyskiem algorytm odnalazł zdecydowanie więcej składowych. Świadczy to o uszkodzeniu bieżni zewnętrznej. Jako wyznacznik pomocny w określeniu stanu łożyska

## INDUCTION MOTOR BEARING DIAGNOSTICS WITH MEASUREMENTS OF SUPPLY CURRENT AND VIBRATIONS

Bearing failure amount is greater than 40% of all engine failures, so their damage-free operation is so important. This paper discusses results of tests performed by author, related to the engine bearings diagnostic using vibration and stator current measurements. The vibration based bearing diagnostics method has a major disadvantage - it requires the availability of the machine for sensors installation. This is the main reason to develop new methods based on motor supply current analysis. It can be assumed that each bearing defect causes radial movement between the rotor and stator of the machine. These changes generate additional stator current harmonics. The test procedure was based on the simultaneous measurement of motor current and bearings vibrations. Studies show different results for two stages of motor operation: normal and with damaged bearings. Moreover, the paper describes an algorithm used to obtain diagnostic information. Studies have shown that it is possible to detect the type of damage using the method of supply current measurement.

**Keywords:** bearings diagnostic, bearing defects, induction motor

przyjęto sumę wartości składowych oznaczonych w widmie. W tym przypadku dla łożyska nieuszkodzonego wynosi ona 22, natomiast dla łożyska uszkodzonego 304. Po przeprowadzeniu większej liczby pomiarów należałoby wyznaczyć wartości graniczne tej sumy na podstawie, których następowałaby klasyfikacja łożyska. Diagnoza postawiona na bazie uzyskanych wyników jest zgodna ze stanem faktycznym.

## 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Obie prezentowane metody poprawnie wykryły wprowadzone uszkodzenie. Metoda wibracyjna pozwala określić rodzaj oraz stopień uszkodzenia, natomiast metoda prądowa wykrywa jedynie rodzaj defektu. Diagnostyka prądowa wymaga dalszych badań, aby zwiększyć wiarygodność diagnoz a także móc określić stopień rozwoju uszkodzenia. Kolejne prace prowadzone przez autora będą zmierzały w kierunku poszukiwania nowych algorytmów diagnostycznych, podnoszących prawdopodobieństwo trafnych diagnoz, uzyskiwanych w oparciu o pomiar prądu. Aktualnie trwają prace nad algorytmami opartymi o logikę rozmytą oraz metody sztucznej inteligencji.

## 5. BIBLIOGRAFIA

1. Schoen R. R., Habetler T. G., Kamran F., Bartheld R. G., Motor bearing damage detection using stator current monitoring. IEEE vol.31, Nov/Dec 1995.
2. Swędrowski 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. IEEE, Arsenal Research 2005 pp. 131-136.
3. Swędrowski L., Wołoszyk M., Ziółko M.: Nowe rozwiązanie przetwornika prądu w diagnostyce prądowej silników indukcyjnych, Pomiary Automatyka Kontrola nr 12, 2011, s. 1570 – 1572.
4. Swędrowski L., Diagnostics measurement of current supplying an electric motor. XVII IMEKO World Congress – Metrology in the 3rd Millennium. Dubrovnik, Croatia, June 2003.
5. Swędrowski L., Nowa metoda diagnostyki silnika indukcyjnego oparta na pomiarze i analizie widmowej prądu zasilającego, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005.

