

## METODYKA DIAGNOSTYKI ŁOŻYSK SILNIKA INDUKCYJNEGO POPRZEZ POMIAR I ANALIZĘ WIDMOWĄ PRĄDU ZASILAJĄCEGO

Leon SWĘDROWSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
ul. Narutowicza 11/12, 80-952, Gdańsk, e-mail: lswe@ely.pg.gda.pl

### Streszczenie

Uszkodzenia łożysk są najczęstszą przyczyną awarii silników indukcyjnych klatkowych. Pojawienie się takich uszkodzeń w silniku jest źródłem odkształcenia prądu zasilającego. Celem pracy było podniesienie dokładności i wiarygodności diagnostyki łożysk w silnikach za pomocą pomiaru i analizy prądu zasilającego. Uzyskano to opracowując nową metodę badawczą, w której obliczenie zarówno prędkości kątowej silnika jak i częstotliwości sieci zasilającej jest wykonywane na podstawie tej samej próbki czasowej prądu, która dalej jest wykorzystane do analizy widmowej składowych harmonicznych charakterystycznych dla uszkodzeń łożysk. Przedstawione wyniki badań potwierdzają zalety nowej metody diagnostycznej.

Słowa kluczowe: Diagnostyka łożysk, silnik indukcyjny, analiza prądu

## THE METHOD OF ROLL BEARINGS DIAGNOSTICS IN THE INDUCTION MOTOR BY CURRENT MEASUREMENTS AND ANALYSIS

### Summary

Damage of bearings is the most common cause of failures of squirrel-cage induction motors. Faulty bearing results in the harmonic content of stator currents. The aim of this work was increasing the reliability of bearing diagnostics of induction motors by measurements and analysis of supply current. It was reached by new created diagnostic method. In this method the measurement of the angular velocity and of the supply network frequency are carried out and averaged over the same time interval in which the current signal sample has been taken for spectrum analysis of diagnostic components. The presented results confirms the advantages of the new diagnostic method.

Keywords: Bearings diagnostics, induction motor, current analysis

### 1. WSTĘP

Istnieje szereg metod diagnostycznych, które umożliwiają oszacowanie stanu technicznego silnika indukcyjnego. Dziedziną zainteresowań autora referatu jest diagnostyka silników indukcyjnych przy wykorzystaniu analizy widmowej pomiarów prądu zasilającego silnik. Tą drogą możliwe jest wykrycie uszkodzeń uzwojeń, łożysk oraz innych elementów mechanicznych.

Pojawienie się określonych typów uszkodzeń w silniku jest źródłem odkształcenia prądu zasilającego. Zagadnienie określenia zależności teoretycznych wiążących zmiany w prądzie z uszkodzeniami łożysk rozwiązano budując model matematyczny silnika indukcyjnego wrażliwy na wprowadzanie zakłóceń symulujących założone rodzaje uszkodzeń [3].

Opracowany model umożliwił ujawnienie takich zależności prądu silnika od wprowadzanych uszkodzeń, które dotychczas nie były opisywane w literaturze.

Fizyczna realizacja diagnostyki prądowej łożysk napotyka na problemy pomiarowe wynikające z tego, że amplitudy składowych niosących informacje diagnostyczne są małe w porównaniu z dominującą składową sieciową. Dotyczy to uszkodzeń mechanicznych, na przykład uszkodzeń łożysk, gdzie stosunek amplitud składowej o częstotliwości sieciowej do składowych niosących informacje diagnostyczne jest rzędu 60 dB. Diagnostyka łożysk jest jednakże bardzo istotna, gdyż jak wskazuje statystyka [5] w przeważającej części awariom ulegają łożyska.

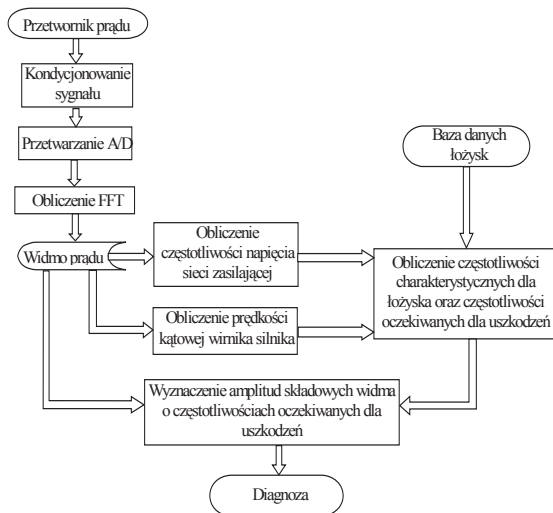
Znane sposoby diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego poprzez pomiar i analizę widmową prądu zasilającego polegają na pomiarze prędkości kątowej silnika i częstotliwości napięcia sieci zasilającej za pomocą dodatkowych urządzeń pomiarowych a następnie obliczenie na tej podstawie częstotliwości charakterystycznych dla określonych uszkodzeń łożyska. W drugim etapie pobierana jest próbka czasowa krzywej prądu, którą następnie poddaje się analizie widmowej. Przy

takim podejściu brak synchronizacji pomiarów prędkości kątowej, częstotliwości i widma. W efekcie częstotliwości obliczone na podstawie wzorów teoretycznych nie pokrywają się z uzyskanymi z eksperymentu. Powoduje to komplikację stosowanych metod analizy sygnału, a uzyskiwane wyniki są mało wiarygodne [1, 2, 4, 9].

## 2. NOWA METODA POMIARU I ANALIZY

Zaproponowano nowy sposób i układ do pomiaru składowych harmonicznym w widmie prądu silnika, charakterystycznych dla uszkodzeń łożyska [6]. Charakteryzuje się on tym, że obliczenie zarówno prędkości kątowej silnika jak i częstotliwości sieci zasilającej jest wykonywane na podstawie tego samego widma, które dalej jest wykorzystane do pomiaru składowych harmonicznym charakterystycznych dla uszkodzeń łożysk. W ten sposób uzyskuje się zgodność częstotliwości składowych obliczonych teoretycznie ze zlokalizowanymi w widmie. Dodatkowo urządzenia do pomiaru prędkości kątowej silnika jak i częstotliwości sieci zasilającej są tu zbędne.

Schemat blokowy zaproponowanej metody przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Zaproponowana metoda analizy prądu silnika dla celów diagnostycznych

Dla podniesienia dynamiki pomiarów zaproponowano stłumienie podstawowej składowej harmonicznym jeszcze w części analogowej systemu a następnie wzmocnienie pozostałego sygnału i dalej poddania go analizie widmowej.

## 3. SYMULACJA FIZYCZNA

Widmo prądu silnika, w którym są uszkodzone łożyska jest złożone i przez to trudne do analizy. W pierwszym etapie badań eksperymentalnych, dla łatwiejszego określenia występujących zależności,

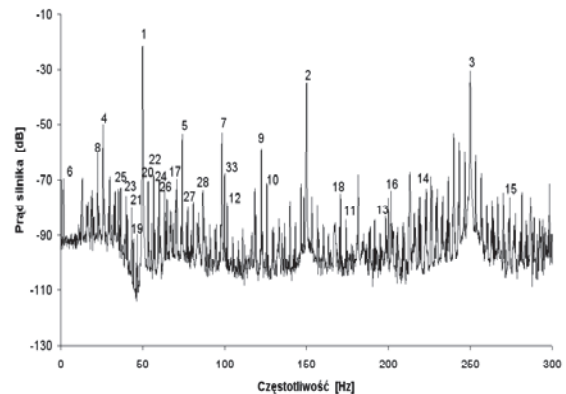
zdecydowano wymusić w silniku oscylację szczeliny powietrznej o jednej, regulowanej częstotliwości. Aby to uzyskać do korpusu badanego, elastycznie posadowionego silnika indukcyjnego przymocowano silnik prądu stałego o zmiennej prędkości obrotowej. Wirnik tego ostatniego silnika posiadał specjalnie dodaną masę mimośrodową wprawiającą w trakcie pracy korpusy obydwu silników w drgania o nastawianej częstotliwości. Drgania korpusu silnika indukcyjnego powodują oscylacje szczeliny powietrznej, co symuluje oscylacje wirnika od uszkodzenia łożyska.

Taki sposób przeprowadzania badań symulacyjnych na silniku indukcyjnym jest oryginalną metodą, opracowaną przez autora referatu [7].

Wcześniejsze badania na modelu matematycznym silnika pozwoliły autorowi postawić hipotezę, iż w przypadku wibracji wirnika (wywołanej bądź wibratorem, bądź spowodowanej przez uszkodzone łożysko) każda składowa, istniejąca w silniku bez wibracji zostanie zmodulowana częstotliwością wibracji i jej harmonicznymi. W przypadku rzeczywistych uszkodzeń łożysk częstotliwości wibracji szczeliny powietrznej będą określone zależnościami, znanymi z mechaniki [5]. Zależności te podają jakich częstotliwości można się spodziewać przy określonych typach uszkodzenia łożyska.

Obiektem badanym był silnik o mocy 1,1 kW i dwóch parach biegunów.

Rysunek 2 podaje spektrum prądu silnika indukcyjnego (badanego) pracującego na biegu jałowym bez wibracji (wirnik wibratora pozostaje nieruchomy).



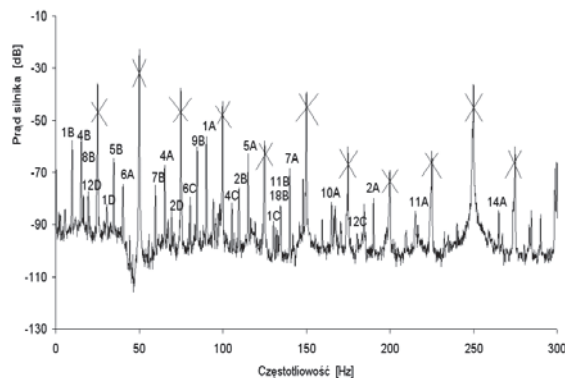
Rys. 2. Widmo prądu silnika indukcyjnego bez wibracji zewnętrznych (obciążenie 70% In)

Na podstawie badań na silniku bez wibracji określono częstotliwości składowych, które powinny pojawić się przy włączonym wibratorem zgodnie z podaną hipotezą.

Rysunek 3 podaje spektrum prądu zasilania silnika dla przypadku aktywnego wibratora generującego drgania o częstotliwości  $f_w = 40$  Hz.

Krzyżkami zaznaczono linie spektralne obecne także w przypadku braku wibracji. Pozostałe, nowe

składowe są efektami modulacji składowych istniejących na rysunku 2 częstotliwościami wibracyjnymi  $\pm f_w$  oraz  $\pm 2f_w$ .



Rys. 3. Widmo prądu biegu jałowego silnika indukcyjnego przy aktywnym wibratorze generującym drgania korpusu silnika badanego o częstotliwości 40 Hz

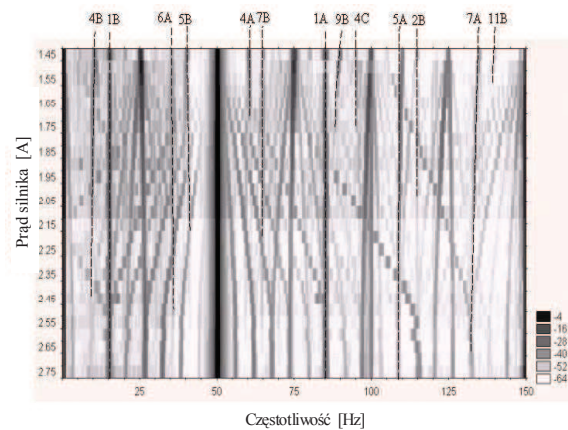
Przykład sposobu oznaczania: symbol 6A na rysunku 4 oznacza modulację składowej o numerze 6 z rysunku 3 częstotliwością  $+f_w$  (litera B oznacza odpowiednio częstotliwość modulującą  $-f_w$ , litera C częstotliwość  $+2f_w$  i litera D częstotliwość  $-2f_w$ ).

Na podstawie wyników badań symulacyjnych na obiekcie sformułowano model matematyczny przebiegu prądu silnika indukcyjnego w przypadku łożysk bez uszkodzeń i z uszkodzeniami. Model sprowadza się do tablicy zależności określających fizyczne źródło składowych harmonicznym w silniku bez uszkodzeń (35 zależności według rysunku 2 dla pasma 0-200 Hz) oraz zdefiniowania 140 zależności określających pochodzenie nowych harmonicznym, pojawiających się w widmie prądu silnika z uszkodzonym łożyskiem.

Te 140 nowych składowych wynika z przyjętej hipotezy, iż wszystkie składowe częstotliwości obecne w widmie silnika z centralnym wirnikiem mogą zostać zmodulowane częstotliwością  $\pm f_w$  oraz  $\pm 2f_w$  gdzie  $f_w$  są częstotliwościami wibracji wirnika wynikającymi z uszkodzenia łożyska.

Przejrzystość rezultatów badań symulacyjnych, w porównaniu z pomiarami na rzeczywiście uszkodzonych łożyskach, pozwoliła na eksperymentalne potwierdzenie przewidywanych zależności wiążących wibracje szczeliny powietrznej ze składowymi widma prądu stojana.

Stwierdzono również fakt tłumienia składowych diagnostycznych w funkcji obciążenia silnika. Ilustruje to rys. 4., na którym poziome linie szarych prostokątów reprezentują widma prądu, otrzymane dla określonych obciążeń silnika. Ciemniejszy kolor oznacza większą amplitudę. Linie przerywane, dodane do rysunku, ukazują zmiany częstotliwości i amplitud składowych w funkcji obciążenia.



Rys. 4. Zależność amplitud i częstotliwości składowych diagnostycznych w widmie prądu silnika indukcyjnego od obciążenia tego silnika

#### 4. BADANIA NA ŁOŻYSKACH

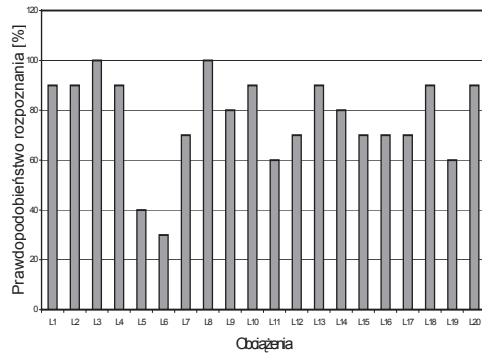
Badania eksperymentalne przeprowadzono na 9 egzemplarzach łożysk, reprezentujących trzy rodzaje uszkodzeń, każde z nich na trzech poziomach: uszkodzenie silne, średnie i słabe oraz na łożyskach bez uszkodzeń.

Ocenę przydatności opracowanej metody diagnostycznej i wzorcowanie systemu diagnostycznego przeprowadzono wykorzystując system diagnostyki wibracyjnej DREAM [8].

Właściwy dobór składowych harmonicznym prądu zasilania silnika jest decydujący dla trafnej diagnozy. Przeprowadzono badania równolegle nad pięcioma zestawami składowych proponowanych jako symptomy uszkodzeń (wybranych spośród 140 teoretycznie możliwych). Najwyższe prawdopodobieństwa trafnych diagnoz uzyskano stosując zestaw składający się z 64 składowych.

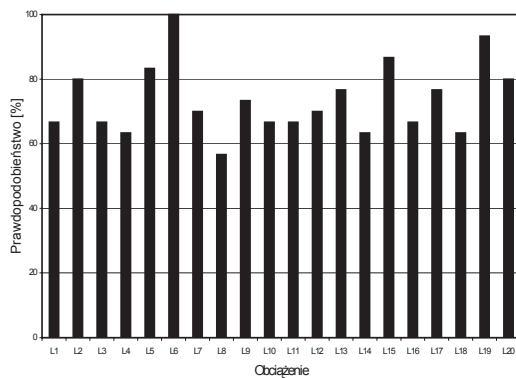
Na rysunku 5 podano uzyskane prawdopodobieństwa rozróżnienia łożyska uszkodzonego od nieuszkodzonego w zależności od obciążenia.

Zaproponowana metoda pomiaru i analizy prądu zasilającego silnik indukcyjny pozwala także na rozpoznanie jednego z trzech rodzajów uszkodzeń łożysk: uszkodzenie elementu tocznego, pierścienia zewnętrznego lub pierścienia wewnętrznego. Rodzaj uszkodzenia jest istotny dla prognozowania szybkości jego dalszego rozwoju.



Rys. 5. Prawdopodobieństwo poprawnego rozpoznania ogólnego stanu łożyska w zależności od obciążenia

Uzyskane w badaniach prawdopodobieństwa trafnego rozpoznania rodzaju uszkodzenia podano na rysunku 6.



Rys. 6. Prawdopodobieństwo trafnego rozpoznania rodzaju uszkodzenia w zależności od obciążenia

## 5. WNIOSKI

1. Diagnostyka łożysk w oparciu o analizę widma prądu staje się łatwiejsza w przypadku, gdy silnik nie jest obciążony – w widmie jest wtedy więcej składowych diagnostycznych o większych amplitudach.
2. Prawdopodobieństwo poprawnej klasyfikacji łożysk silnika do kategorii uszkodzonych bądź nieuszkodzonych na biegu jałowym i małych obciążeniach jest powyżej 90%, przy większych obciążeniach spada do 80%.
3. Osiągnięty poziom trafności takich diagnoz pozwala na budowę systemów stałego monitoringu stanu łożysk poprzez pomiar i analizę prądu stojana, opartych na opracowanej metodyce.
4. Średnie prawdopodobieństwo rozpoznania rodzaju uszkodzenia dla różnych obciążeń wynosi 70%, czyli tyle ile uzyskuje się w diagnostyce wibracyjnej przy jednokrotnym pomiarze, bez znajomości historii urządzenia.

## LITERATURA

- [1] H. Calis, P.J. Unsworth: Fault diagnosis in induction motors by motor current signal analysis. *Proc. SDEMPED '99*, 1999, str.237-241.
- [2] G.B. Kliman, J.Stein: Methods of motor current signature analysis. *Electric machines and power systems*. 1992, vol. 20, No.5, str.463-474.
- [3] J. Rusek, L. Swędrowski: Wykorzystanie modelu silnika indukcyjnego klatkowego do prądowej diagnostyki jego łożysk. *Materiały XIII Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych*, 2003, 8-11 września Kraków, str.237-244.
- [4] R.R. Schoen, T.G. Habetler, F. Karman, R.G. Bartheld: Motor bearing damage detection using stator current monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Nov/Dec 1995, vol.31, No. 6, str.1274-1279.
- [5] J.R. Stack, T.G. Habetler, R.G. Harley: Effects of machine speed on the development and detection of rolling element bearing faults. *IEEE Power Electronics Letters*. March 2003, vol.1, no. 1, str.19-21.
- [6] L. Swędrowski: Sposób i układ do przeprowadzania badań diagnostycznych silnika indukcyjnego, zwłaszcza jego łożysk tocznych". *Zgłoszenie patentowe nr P-364252*, 2003.
- [7] L. Swędrowski: Diagnostic measurement of current supplying an electric motor. *Proc. XVII IMEKO World Congress -Metrology in the 3rd Millennium*. 2003, Dubrovnik, Croatia, str.1426-1429.
- [8] VAST, Inc. VibroAcoustical Systems and Technologies. DREAM for Windows - Specification. 2002.
- [9] B. Yazici, G.B. Kliman: An adaptive statistical time-frequency method for detection of broken bars and bearing faults in motors using stator current. *IEEE Transactions on Industry Applications*. March/April 1999, Vol.35, No. 2, str.442-452.



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

(obecna nazwa - Wydział Elektrotechniki i Automatyki) Politechniki Gdańskiej Dziedziny jego zainteresowań to pomiary wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi, diagnostyka techniczna, pomiary o wysokiej dokładności