

Tomasz CISZEWSKI\*  
Leon SWĘDROWSKI\*  
Marek WOŁOSZYK\*  
Michał ZIÓLKO\*

## **PORÓWNANIE WYNIKÓW BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH ŁOŻYSK SILNIKA INDUKCYJNEGO POPRZEZ POMIARY WIBRACJI I PRĄDU STOJANA**

W referacie omówione są wyniki badań, wykonanych przez autorów, dotyczące diagnostyki łożysk silników z wykorzystaniem pomiarów wibracji oraz prądu stojana.

Diagnostyka łożysk metodami wibracyjnymi ma jedną wadę – wymaga dostępności obiektu dla zainstalowania czujników. Jest to przyczyna poszukiwania nowych metod opartych na analizie prądu zasilającego silnik. Można przyjąć, że każda wada łożyska powoduje promieniowy ruch pomiędzy wirnikiem a stojanem maszyny. Zmiany te generują dodatkowe harmoniczne prądu stojana. W referacie został opisany komputerowy system pomiarowy, opracowany do pomiaru tych harmonicznych a także metoda przetwarzania sygnałów dla uzyskania informacji diagnostycznych oraz wyniki badań uzyskiwanych z pomiarów na obiektach z celowo wprowadzonymi uszkodzeniami łożysk.

### **1. WPROWADZENIE**

Podczas eksploatacji silnika indukcyjnego mogą pojawić się uszkodzenia w częściach mechanicznych oraz w układzie elektromagnetycznym. Z analiz statystycznych wynika, iż najczęściej występującym defektem są uszkodzenia łożysk (ponad 40% wszystkich uszkodzeń). Dlatego diagnostyka tego elementu maszyny jest tak istotna z punktu widzenia bezawaryjnej pracy układu napędowego. W pracy omówione zostaną wyniki badań, wykonanych przez autorów, dotyczące diagnostyki łożysk silników z wykorzystaniem pomiarów wibracji oraz prądu stojana.

Diagnostyka łożysk metodami wibracyjnymi została dobrze opracowana zarówno od strony sprzętowej, jak i algorytmów diagnostycznych. Przy wykorzystaniu tradycyjnych akcelerometrów piezoelektrycznych ma ona jednakże jedną wadę – wymaga dostępności obiektu dla zainstalowania czujników. Jest to przyczyna poszukiwania nowych metod opartych na analizie prądu zasilającego

---

\* Politechnika Gdańska.

silnik. Można przyjąć, że każda wada łożyska powoduje promieniowy ruch pomiędzy wirnikiem a stojanem maszyny. Powoduje to zmiany szczeliny powietrznej maszyny w sposób, który można opisać kombinacją wirujących nieregularności w dwóch kierunkach, zgodnie i przeciwnie do kierunku wirowania wirnika. Zmiany te generują dodatkowe harmoniczne prądu stojana [4], [5]. W składowych prądu (i mocy) znajdują odbicie wszystkie najczęstsze uszkodzenia w silniku – łożysk, uzwojenia stojana i wirnika.

Podobne cechy ma metoda, oparta o pomiary i analizę przebiegów iloczynu chwilowych wartości napięcia i prądu zasilającego [3]. W tej metodzie w widmie iloczynu pojawia się składowa o częstotliwości wibracji, której brak w widmie prądu. Jest to dodatkowy symptom diagnostyczny, którego przydatność jest w trakcie badań.

Problemy pomiarowe związane z metodami diagnostycznymi opartymi o wielkości elektryczne związane są z niskim poziomem sygnałów diagnostycznych na tle wysokiego poziomu innych składowych, szczególnie przy diagnostyce łożysk. Powoduje to konieczność stosowania niskoszumowych elementów i układów toru pomiarowego, szczególnie na jego wejściu.

Na podstawie poprzednich badań [2, 7] oszacowano, że poziom szumu nie powinien przewyższać -90 dB w stosunku do największych składowych w widmie prądu. W związku z tym zaprojektowano specjalny niskoszumowy układ pomiarowy. W porównaniu do poprzednich prac autorów nad diagnostyką prądową łożysk, ten układ został znacznie ulepszony.

W referacie opisany jest nowy komputerowy system pomiarowy, opracowany do pomiaru tych harmonicznnych a także metoda przetwarzania sygnałów dla uzyskania informacji diagnostycznych. Przedstawione są również wybrane wyniki badań uzyskiwanych z pomiarów na obiektach z celowo wprowadzonymi uszkodzeniami łożysk. Dla celów tych badań przygotowano szereg łożysk o ściśle określonych uszkodzeniach.

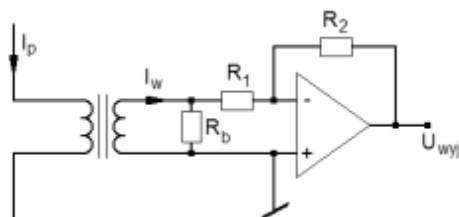
Ze względu na możliwość pojawiania się w trakcie pomiarów uszkodzeń wtórnych, w prezentowanych badaniach weryfikacja uzyskiwanych wyników następowała poprzez ocenę stanu łożysk za pomocą systemu diagnostyki wibracyjnej. W referacie przedstawione jest porównanie wyników, uzyskanych za pomocą metod wibracyjnych i prądowych oraz zaprezentowane są wnioski, osiągnięte przy obecnym stanie badań, dotyczące przydatności pomiarów sygnałów elektrycznych w diagnostyce łożysk silników.

## 2. UKŁAD POMIAROWY

Do pomiaru prądu zasilającego silnik zaproponowano wejściowy układ pomiarowy, którego uproszczony schemat przedstawiono na rysunku 1.

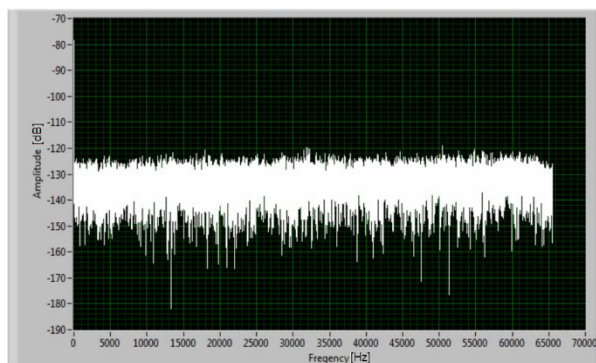
Główną częścią układu jest transformator, nawinięty na rdzeniu ferrytowym wysokiej klasy oraz wzmacniacz operacyjny, który ma najniższe szumy własne,

spośród elementów dostępnych na rynku. Transformator pracuje z wymuszeniem prądowym - przez jego uzwojenie pierwotne przepływa prąd zasilający uzwojenie silnika.



Rys. 1. Schemat ideowy zaproponowanego układu pomiarowego

Przetwornik został przebadany w układzie laboratoryjnym, w którym sygnał z układu pomiarowego jest podany na 24 bitową kartę przetwarzania A/C w kasecie PXI. Układ pomiarowy zasilany był z akumulatorów i zamknięty był z ekranującej od pól magnetycznych obudowie. Do badań stworzono specjalne oprogramowanie w środowisku LabVIEW. Przykładowe widmo szumów przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Charakterystyka częstotliwościowa szumów przetwornika z kartą akwizycji danych

Jak widać poziom szumów własnych układu pomiarowego spełnia postawione wymagania. Wyniki badań układu pomiarowego są opisane szerzej w publikacji [6].

### 3. WYNIKI BADAŃ ŁOŻYSK

Procedura badawcza polegała na jednoczesnym pomiarze prądu zasilającego silnik oraz wibracji w węzle łożyskowym. Diagnostyka drganiowa sprowadza się do odnalezienia w widmie wibracji składowych o częstotliwościach charakterystycznych oraz ich krotności, a także oszacowania wartości tych

składowych. Zależności definiujące częstotliwości charakterystyczne dla danych uszkodzeń prezentują równania [1]: (1), (2), (3) oraz (4).

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

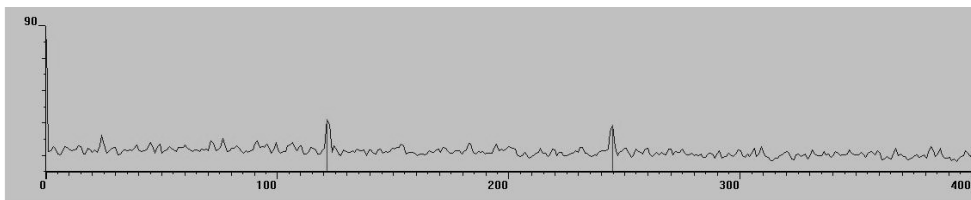
$$f_{in} = \frac{1}{2} \frac{n}{60} \left( 1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \alpha \right) N_b \quad (2)$$

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

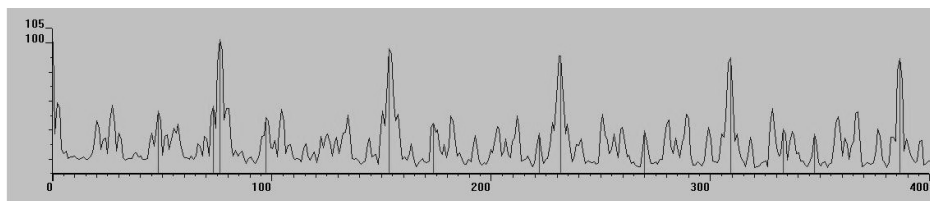
$$f_{rol} = \frac{1}{2} \frac{n}{60} \frac{P_d}{B_d} \left( 1 - \frac{B_d^2}{P_d^2} \cos^2 \alpha \right) \quad (4)$$

gdzie:  $f_{out}$  – częstotliwość przetaczania elementów tocznych po zewnętrznym pierścieniu,  $f_{in}$  – częstotliwość przetaczania elementów tocznych po wewnętrznym pierścieniu,  $f_c$  – częstotliwość koszyka,  $f_{rol}$  – częstotliwość elementów tocznych,  $n$  – prędkość kątowna [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 diagnostycznego „DREAM”. Wyniki badań wibracyjnych przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Wyniki badania metodą wibracyjną łożyska bez uszkodzeń

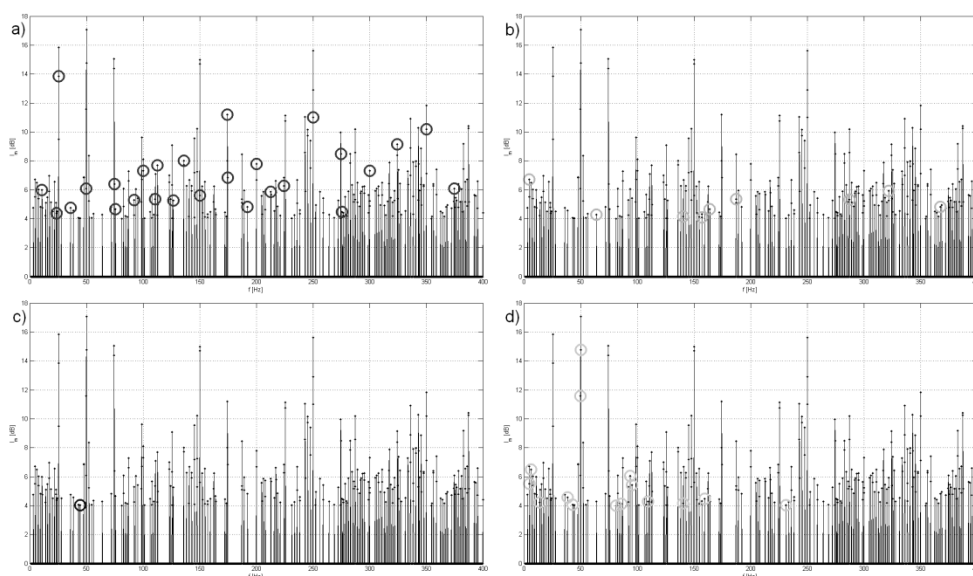


Rys. 4. Wyniki badania metodą wibracyjną łożyska z uszkodzoną bieżnią zewnętrzną

Wibracje są mierzone bezpośrednio na węzle łożyskowym. W widmie drgań można łatwo odnaleźć prążki świadczące o uszkodzeniu danego elementu. Ze względu na zjawiska fizyczne zachodzące w maszynie indukcyjnej, składowe

o częstotliwościach charakterystycznych nie występują w widmie prądu w sposób jawny.

W monografii [7] opisano wpływ drgań na widmo prądu oraz częstotliwości składowych tego widma, występujących w trakcie normalnej pracy i przy uszkodzeniach. W trakcie badań, prezentowanych w niniejszym referacie, na podstawie tej monografii wyznaczono składowe prądu, występujące podczas pracy silnika nieuszkodzonego. Na tej podstawie obliczono również częstotliwości składowych, których wystąpienie świadczy o obecności poszczególnych uszkodzeń łożyska. Rezultaty tych badań przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Widmo amplitudowe prądu silnika z uszkodzonym łożyskiem

Na rysunkach 5 a) b) c) oraz d) przedstawiono to samo widmo amplitudowe prądu, przy czym na rysunku 5 a) oznaczono występujące składowe uszkodzeniowe, których częstotliwości zostały obliczone przy założeniu uszkodzenia bieżni zewnętrznej (kolor czerwony). Na pozostałych wykresach oznaczono składowe, których częstotliwości zostały obliczone dla kolejnych uszkodzeń: 5 b) bieżni wewnętrznej (kolor zielony), 5 c) elementów tocznych (kolor niebieski) oraz 5 d) koszyka (kolor turkusowy). Aby umożliwić czytelną analizę z widma usunięto wszystkie składowe o amplitudzie poniżej 4 dB w stosunku do średniej wartości szumu.

Dokonano porównania powyższych wykresów pod względem ilości występowania zaznaczonych prążków oraz ich wartości. Najwięcej prążków zaobserwowano na pierwszym wykresie. Posiadają one ponadto duże wartości.

Natomiast inne składowe uszkodzeniowe, obrazowane na wykresach b), c) oraz d) nie są wyraźnie widoczne. Na tej podstawie można stwierdzić, że w łożysku występuje uszkodzenie bieżni zewnętrznej. Jest to zgodne z wynikami uzyskanymi za pomocą metody wibracyjnej. Zatem obie metody prawidłowo wykryły celowo wprowadzone uszkodzenie.

#### 4. WNIOSKI

W metodzie wibracyjnej uzyskana diagnoza jest poprawna. Tą metodą został wykryty nie tylko rodzaj uszkodzenia, ale również jego stopień. W metodzie prądowej na podstawie przeprowadzonych badań można ocenić jedynie rodzaj uszkodzenia. Porównując obie metody, metoda diagnostyki łożysk z wykorzystaniem pomiarów wibracji okazała się skuteczniejsza niż metoda pomiarów prądu stojana. Metoda prądowa wymaga dalszych badań, aby zwiększyć wiarygodność diagnoz a także móc określić stopień rozwoju uszkodzenia. Dalsze badania prowadzone przez autorów będą zmierzały w kierunku poszukiwania nowych algorytmów diagnostycznych, podnoszących prawdopodobieństwo trafnych diagnoz, uzyskiwanych w oparciu o pomiar prądu. Aktualnie trwają prace nad implementacją algorytmów opartych o logikę rozmytą oraz metody sztucznej inteligencji.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w roku 2011  
jako projekt badawczy nr 2389/B/T02/2010/38.*

#### LITERATURA

- [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., Diagnostics measurement of current supplying an electric motor. XVII IMEKO World Congress – Metrology in the 3rd Millenium. Dubrovnik, Croatia, June (2003).
- [3] Dzwonkowski A., Swędrowski L.: The instantaneous power as a diagnostic symptom of the bearing damage. The Fifth International Conference on Condition Monitoring, CM 2008 Heriot-Watt University, Edinburgh, (2008).
- [4] Rusek J., Swędrowski L., Induction machine model for current diagnostics of bearings. Tagungsband 48. Internatio-nales Wissenschaftliches Kolloquium. Ilmenau, (2003).
- [5] 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.

- [6] Swędrowski L., Wołoszyk M., Ziółko M., Nowe rozwiązanie przetwornika prądu w diagnostyce prądowej silników indukcyjnych, *Pomiary Automatyka Kontrola* nr 12, s. 1570 – 1572 (2011).
- [7] Swędrowski L., Nowa metoda diagnostyki silnika indukcyjnego oparta na pomiarze i analizie widmowej prądu zasilającego, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2005.

#### **COMPARISON OF INDUCTION MOTOR BEARING DIAGNOSTIC TEST RESULTS THROUGH VIBRATION AND STATOR CURRENT MEASUREMENT**

The paper discusses results of tests performed by authors, related to the engine bearings diagnostic using vibration and stator current measurements.

Vibration methods for bearing diagnostics have one disadvantage - they require the availability of the machine for sensors installation. This is the reason for seeking 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 paper contains the description of an automatic measurement system, developed for the measurement of those harmonics and processing that data to obtain bearing diagnostic information. System was tested on objects with intentionally made defects in bearings, results of this test was also shown in the paper.