

Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

DIAGNOSTYKA ŁOŻYSK TOCZNYCH W SILNIKACH W WARUNKACH ICH PRZEMYSŁOWEJ EKSPLOATACJI

DIAGNOSTICS OF MOTOR ROLLING BEARINGS IN CONDITIONS THEIR OF INDUSTRIAL EXPLOITATION

Abstract: This article describes the repeated reasons of motor damage in national industry, represented statistics of damage of motors and statistics reasons damage of rolling bearings. The paper presents the diagnostic methods in this for example the envelope analysis methods and measurement results of operating diagnostics.

1. Rodzaje uszkodzeń silników i ich statystyka

Długoletnie obserwacje w zakresie oceny przyczyn awarii silników indukcyjnych klatkowych WN w przemyśle krajowym oraz śledzenie literatury technicznej krajowej i światowej poświęconej temu tematowi upoważniają autora do stwierdzenia, że awaryjność silników w ostatnich latach wyraźnie spada. Wynika to przede wszystkim z poprawy jakości eksploatacji, obsługi i diagnostyki silników, zastosowania coraz lepszych materiałów do ich produkcji, w tym w szczególności dobrych materiałów izolacyjnych, zastosowania coraz lepszych sprzęgieł, łożysk, smarów. Zmienia się statystyka przyczyn uszkodzeń silników WN. Zmniejsza się liczba uszkodzeń obwodu elektrycznego i magnetycznego silników, a relatywnie powiększa się liczba uszkodzeń typu mechanicznego w szczególności łożysk. Występują również coraz częściej uszkodzenia typu luz w układzie np. wał-pakiet wirnika, łożyska-tarcza łożyskowa, oraz uszkodzenia konstrukcji wsporczej i fundamentu. W ocenie własnej statystyka awaryjności maszyn elektrycznych w tym napędów z silnikami indukcyjnymi klatkowymi WN w literaturze przedmiotowej występuje bardzo rzadko. Zakłady przemysłowe bardzo niechętnie udostępniają swoje statystyki przyczyn awarii maszyn, liczby przestojów spowodowanych stanem technicznym maszyn, ilości zużytych łożysk, liczby remontów, itd. Pewną furtkę dla uzyskania informacji na powyższy temat dają działania firm ubezpieczeniowych które „likwidują tak zwaną szkodę” w danym zakładzie.

W technicznym piśmiennictwie polskim na szczególną uwagę zasługują prace B. Draka [2], M. Bernatta i J. Bernatta [1], w których opiswane są przyczyny awarii silników klatkowych

WN w przemyśle krajowym jak również podawana jest statystyka awaryjności tych silników w obszarze działalności technicznej wymienionych Autorów.

W książce [5], która ukazała się w 2004 roku w USA jej autorzy podają uogólnioną statystykę przyczyn awarii maszyn elektrycznych prowadzona przez EPRI na liczbie 7500 maszyn. Statystykę przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1.
Statystyka uszkodzeń maszyn elektrycznych [5]

Przyczyna awarii	Procentowy udział
Łożyska	41%
Stojan	37%
Wirnik	10%
Wyposażenie	12%

Statystykę przedstawioną w tabeli 1. Autor traktuje jako uogólnioną aktualną statystykę uszkodzeń maszyn elektrycznych świata zachodniego. Analizując szczegółowo przyczyny awarii i nieoczekiwanych, nieplanowanych przestojów w napędach z silnikami indukcyjnymi klatkowymi WN w oparciu o własne doświadczenia i obserwacje autor ustalił listę tych przyczyn. Przedstawia się ona następująco:

- łożyska.
- izolacja silników.
- niewyważa, nieosiowość i luzy.
- niesymetria szczeliny.
- klatka.
- mocowanie, fundament, konstrukcje wsporcze

Listę podano w kolejności, od przyczyn najczęściej występujących do tych, które występują najrzadziej. Wnioski autora z obserwacji przy-

czyn awarii silników elektrycznych są podobne do wniosków wynikających z badań przeprowadzonych przez EPRI (tablica 1). Najczęstszymi przyczynami awarii i nieplanowanych postojów silników indukcyjnych klatkowych WN są zła obsługa techniczna łożysk w czasie eksploatacji silników, wadliwa wymiana łożysk w czasie remontów silników.

2. Diagnostyka łożysk tocznych w silnikach

We wszystkich maszynach elektrycznych ułożyskowanie jest jednym z najważniejszych ich elementów. Udział łożysk w ogólnym koszcie maszyn elektrycznych jest najczęściej mały lub bardzo mały, jednak ze względu na funkcję jaką spełniają oraz ze względu na statystyki uszkodzeń diagnostyka ich stanu technicznego ma zasadnicze znaczenie w praktyce eksploatacyjnej.

W maszynie wirnikowej łożyska spełniają zasadniczo dwa zadania [5]:

1. Umożliwiają przeniesienie sił z części obrotowych maszyny do części nieobrotowych i odwrotnie.
2. Zmniejszają opory ruchu pomiędzy częściami obrotowymi maszyny i częściami nieobrotowymi.

Dla spełnienia tych zadań w silnikach indukcyjnych trójfazowych klatkowych stosuje się dwa rodzaje łożysk: łożyska toczne i łożyska ślizgowe. W maszynach elektrycznych w węzłach łożyskowych, łożyska toczne stosowane są tam gdzie jest to tylko możliwe ze względów technicznych. Czynione są starania aby łożyska toczne stosować w silnikach o coraz większych mocach. Autor w oparciu o swoje doświadczenia z eksploatacji silników z łożyskami tocznymi i ślizgowymi stwierdza, że uszkodzenia silników spowodowane uszkodzeniami łożysk ślizgowych zdarzają się rzadko lub bardzo rzadko. Zupełnie inaczej przedstawia się to dla silników z łożyskami tocznymi. Dynamika uszkodzenia łożysk ślizgowych i łożysk tocznych w silnikach jest zdecydowanie odmienna. Uszkodzenie łożysk ślizgowych prawie zawsze przebiega powoli, natomiast uszkodzenie łożysk tocznych bardzo często przebiega gwałtownie.

3. Uszkodzenia łożysk tocznych i ich przyczyny

W łożyskach tocznych występują dwa naturalne procesy zużycia [6]:

1. Zużycie zmęczeniowe.
2. Ścierne zużycie powierzchni roboczych.

Ścieranie się powierzchni łożysk narasta w miarę upływu czasu ich eksploatacji. Przetaczanie się części tocznych powoduje zmiany jakościowe w materiale. Zmęczenie powierzchni których zewnętrznym objawem jest wykruszanie się fragmentów łożyska występuje w końcowym okresie trwałości łożyska. Zjawisko to przebiega lawinowo i prowadzi do tak zwanej śmierci technicznej łożyska. Wystąpienie zmęczeniowego zużycia powierzchni zostało przyjęte za podstawę kryterium obliczania trwałości łożysk – L_{10} [4]. Obok trwałości nominalnej L_{10} spotykamy pojęcie „trwałości eksploatacyjnej łożysk tocznych” oraz „trwałości dokumentacyjnej łożysk tocznych” [4]. Trwałość eksploatacyjna jest rzeczywistą trwałością osiągniętą przez dane łożysko zanim stanie się ono niezdolne do użytku. Trwałość dokumentacyjna łożyska tocznego jest trwałością określoną przez konstruktora maszyny i opiera się na hipotetycznych danych odnośnie, obciążenia i prędkości przyjętych przez konstruktora dla konkretnego przypadku.

Tabela 3.

Statystyka przyczyn uszkodzeń łożysk tocznych wg SKF [4]

Przyczyna uszkodzenia	Procentowy udział
Złe smarowanie	36%
Zmęczenie	34%
Zły montaż	16%
Zanieczyszczenia	14%

Z wieloletnich badań autora [6] wynika że uszkodzenie się łożysk tocznych stanowi najczęstszą przyczynę awarii i nieplanowanych postojów silników elektrycznych. Bardzo ważnym zagadnieniem jest statystyka uszkodzenia się łożysk tocznych, statystyka powodów uszkodzenia się tych łożysk. Zagadnienie to jest przedmiotem intensywnych badań czołowych producentów łożysk tocznych takich jak SKF, FAG, NSK, NTN, itd. SKF w najnowszych publikacjach z lat 1999÷2005 [4] podaje wyniki swoich badań. Przedstawiono je w tabeli 3.

Analizując informacje zawarte w tabeli 3. podane w oparciu o najnowsze wyniki badań sformułować należy wniosek że przedwczesnych jest aż 66% uszkodzeń łożysk tocznych (36%+16%+14%), tylko 34% uszkodzeń wynika z naturalnego procesu zużycia. Analizując

dalej wyniki badań należy stwierdzić, że prowadząc właściwą eksploatację i diagnostykę maszyn można zapobiec aż 66% uszkodzeniom łożysk tocznych. Kolejny ważny wniosek to stwierdzenie, że aż 50% przedwczesnych uszkodzeń łożysk tocznych jest spowodowane złym smarowaniem i zanieczyszczeniem smaru, 16% uszkodzeń to zły montaż. Wnioski podane wyżej są wytycznymi dla diagnostyki łożysk tocznych. Techniki diagnostyczne łożysk tocznych powinny obok możliwości określenia na bieżąco stanu technicznego łożyska tocznego umieć określić stan jego smarowania, a jeszcze wcześniej stan jego zamontowania.

Aktualnych, krajowych statystyk w zakresie przyczyn uszkodzeń łożysk tocznych w maszynach wirujących autor nie spotkał. Z obserwacji i badań autora wynika, że w kraju zużycie łożysk tocznych jest zbyt duże w stosunku do zainstalowanych maszyn i urządzeń. Producenti silników elektrycznych w silnikach indukcyjnych trójfazowych klatkowych WN trwałość dokumentacyjną łożysk tocznych oceniają na 50000-60000 godzin [4]. W silnikach niskich napięć trwałość dokumentacyjna jest szacowana na 20000-30000 godzin [4]. W praktyce eksploatacyjnej ta trwałość czyli trwałość eksploatacyjna jest mniejsza. W 30 letniej praktyce inżynierskiej autorowi udało się 1 raz badać diagnostycznie silnik WN, w którym łożyska przepracowały 60000 godzin. Przeciętnie czas życia łożysk tocznych w silnikach WN w warunkach krajowych jest mniejszy – około 30000-45000 godzin. Dla silników niskich napięć ta relacja jest podobna.

Doświadczenia i badania autora wskazują, że przyczyną nadmiernego zużycia łożysk tocznych w silnikach w warunkach krajowych jest przede wszystkim: zły montaż oraz złe smarowanie, połączone z podawaniem do komory łożyskowej zanieczyszczonego smaru. Wadliwie pracujące łożyska w silniku elektrycznym mogą być rozpoznane na podstawie określonych symptomów. Najczęściej są to :

1. Konieczna zbyt częsta wymiana łożysk w silniku.
2. Niewłaściwe ślady współpracy łożyska, widoczne po demontażu łożyska.
3. Charakterystyczne zmiany w hałasie.
4. Zmiana sygnału drganiowego.
5. Luźne osadzenie łożyska na wale.
6. Utrudnione obracanie się wału.
7. Zwiększona temperatura łożyska.

8. Charakterystyczne zmiany w widmie prądu stojana.

9. Zmiany w smarze łożyska.

Ocenę obiektywną stanu łożysk tocznych przeprowadza się najczęściej w oparciu o analizę sygnału drganiowego, pomiar temperatury i niekiedy przez wykorzystanie zmian w widmie prądu stojana silnika. W ocenie własnej można wyodrębnić następujące najważniejsze metody diagnozowania łożysk tocznych w silnikach elektrycznych:

1. Wykorzystanie ustaleń normowych ISO
2. Wykorzystanie amplitudowych dyskryminant bezwymiarowych procesów wibroakustycz.
3. Metodę SPM (Shock Pulse Method).
4. Metodę SPA (Shock Profile Area).
5. Metodę energii impulsowej SE (Spike Energy) firmy IRD.
6. Metodę firmy Schenck – BCU (Bearing Condition Unit).
7. Metodę analizy częstotliwościowej w tym CPB (Constant Percentage Bandwidth).
8. Metodę Głównego Instytutu Górniczego w Katowicach .
9. Metodę SEE (Spectral Emitted Energy) firmy SKF.
10. Metodę HFD (High Frequency Detecion).
11. Metodę REBAM ® (Rolling Element Bearing Active Monitor) firmy Bentley Nevada Corporation.
12. Metodę emisji akustycznej.
13. Metodę detekcji obwiedni.
14. Metodę wykorzystania sygnału prądowego.
15. Zespół metod oceny stanu smarowania.

Od wielu lat na Politechnice Opolskiej [3] w Zespole zajmującym się diagnostyką maszyn elektrycznych autor wraz z Kolegami prowadzi badania nad przydatnością dostępnych metod diagnostycznych do oceny stanu łożysk tocznych w silnikach, nad ich modyfikacjami i adaptacją. Są to badania eksperymentalne, które w pierwszej fazie były prowadzone na silnikach trójfazowych klatkowych małej mocy. W pierwszym okresie badania prowadzono na populacji 30 silników z łożyskami w bardzo dobrym stanie, które następnie wymieniono na łożyska uszkodzone. Uszkodzenia były znane i typowe. Jednocześnie rozszerzono populację badanych silników. Co 2 tygodnie wykonywano badania diagnostyczne na silnikach WN potrzeb własnych w jednej z krajowych elektrowni, elektrociepłowni i ciepłowni na populacji 70 silników. Badania obejmowały okres co naj-

mniej 60000 godzin pracy danego silnika od chwili zamontowania w nim nowych łożysk. Zakres tych badań poszerzono o pomiary temperaturowe oraz o analizę zmian w widmie prądu stojana. Nieregularnie, bez ściśle określonego harmonogramu w okresie 20 lat badano diagnostycznie silniki WN na populacji 640 silników, otrzymując przeszło 50000 pomiarów diagnostycznych (wszystkie są zarchiwizowane). Co najmniej połowa dotyczy łożysk tocznych w silnikach elektrycznych. Badania są prowadzone do chwili obecnej. Na 10 silnikach WN badania trwają nieprzerwanie od 13 lat. W tym czasie w ich węzłach łożyskowych łożyska wymieniono kilka razy. Średni „czas życia” w tych silnikach to 30000÷45000 godzin. Tylko w jednym silniku WN badanym nieregularnie łożyska toczne pracują przeszło 60000 godzin. Z badanej populacji ogólnej 710 silników 86% stanowiły silniki produkcji krajowej, pozostała część to silniki produkcji zachodniej. Silniki zachodnie miały fabrycznie zdecydowanie lepiej przygotowane punkty do pomiarów drgań. W silnikach krajowych w wielu wypadkach punkty pomiarowe należało specjalnie przygotowywać – fazować powierzchnię, wyrównywać, szlifować, kleić elementy pośrednie.

Spośród wszystkich przebadanych metod diagnozowania stanu technicznego łożysk tocznych w silnikach elektrycznych w warunkach przemysłu krajowego stwierdzono że największą przydatność ma metoda detekcji obwiedni oraz metoda SPM. Metoda SPM wymaga najczęściej specjalnego przygotowania silnika przez jego producenta do pomiarów. Na populację 610 silników tylko 8 silników było specjalnie przygotowanych do diagnozowania stanu technicznego ich łożysk tocznych metodą SPM. Metodę SPM autor stosował również w silnikach, które nie były specjalnie przygotowane do pomiarów, ale budowa ich węzła łożyskowego (dysponowano dokumentacją) pozwalała na stosowanie tej metody. Metodę detekcji obwiedni w wyniku doświadczeń badawczych zmodyfikowano. Autor uważa, że metoda daje możliwości najtrafniejszego diagnozowania łożysk tocznych pod warunkiem jej modyfikacji. Autor proponuje następującą technologię pomiarów diagnostycznych:

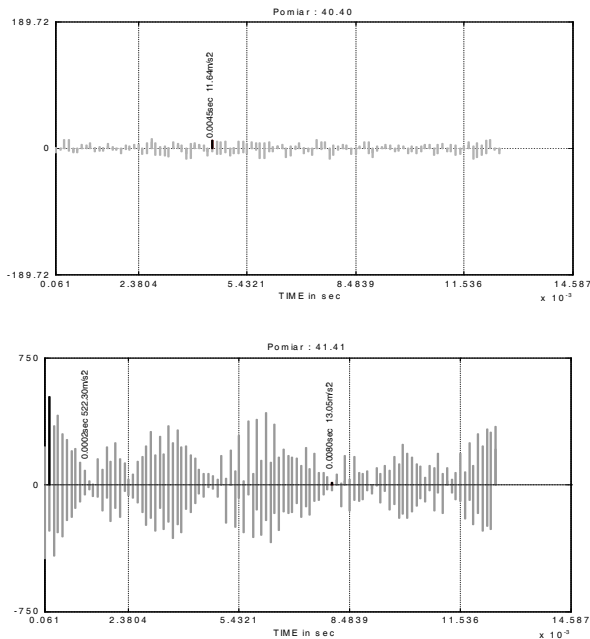
1. Czujnik drgań – akcelerometr, należy umieszczać w oknie emisji łożyska to znaczy w strefie jak największego obciążenia – rys.1 poza strefą odrzutnika smaru



Rys.1. Usytuowanie akcelerometru na silniku przy diagnostyce łożysk tocznych

2. Należy mierzyć wartość chwilową przyspieszenia drgań w jak najszerszym zakresie częstotliwości, minimum 20kHz, korzystnie 40kHz, 60kHz i więcej. Pomiary diagnostyczne prowadzimy umieszczając czujnik zawsze w tym samym punkcie. Dla pierwszej oceny stanu technicznego łożyska tocznego należy wykonać analizę przyspieszenia drgań w dziedzinie czasu, stwierdzić czy występuje zjawisko modulacji amplitudowej i jakie są wartości szczytowe przyspieszenia – rys. 2. Sygnał drganiowy z węzłów łożyskowych silników pracujących w warunkach ustalonych ma charakter sygnału losowego stacjonarnego ergodycznego z modulacją amplitudową. Uszkodzenie łożyska tocznego w silniku pogłębia tą modulację. Modulacja częstotliwościami generowanymi przez łożysko może być wykorzystana do diagnostyki uszkodzenia.

3. Następnie wykonujemy filtrację sygnału przyspieszenia drgań filtrem pasmowo-przepustowym ustawionym na częstotliwość środkową odpowiadającą częstotliwości drgań własnych węzła łożyskowego bądź niewiele się od niej różniącą (pasmo przepustowe filtru powinno tą częstotliwość obejmować). Kolejnym krokiem jest prostowanie i tworzenie obwiedni. Analiza częstotliwościowa powinna być poprzedzona obliczeniami częstotliwości charakterystycznych dla danego łożyska. Powinniśmy dysponować precyzyjnymi informacjami o badanym łożysku. Niezbędna jest informacja o nr ISO danego łożyska oraz producencie łożyska. łożyska o takim samym nr ISO, ale od różnych producentów będą miały różne częstotliwości charakterystyczne. Zilustrowano to dla przykładu w tabeli 4.



Rys.2. Sygnał przyspieszenia drgań łożyska tocznego dla przykładowego silnika, rys. górny łożysko w dobrym stanie rys. dolny, łożysko w złym stanie technicznym

Tabela 4.

Częstotliwości charakterystyczne dla łożyska NU 326 od różnych producentów, prędkość obrotowa wału silnika $n=1488\text{obr/min}$.

Rodzaj uszkodzenia	Łożysko SKF	Łożysko FAG
Uszk. koszyka, FTF	10,09Hz	9,99Hz
Uszkodzenie elementu tocznego, BDF	64,58Hz	61,78Hz
Uszkodzenie bieżni zewnętrznej, BDFO	131,39Hz	140,05Hz
Uszkodzenie bieżni wewnętrznej, BDFI	191,06Hz	207,15Hz

Dla przybliżenia procesu zużywania się łożysk tocznych w silnikach elektrycznych przedstawiono poniżej przykładowe wyniki pomiarów dla łożyska NU 326 firmy FAG od strony napędowej w silniku o mocy 800kW, 1485 obr/min. Pomiary diagnostyczne przykładowego silnika rozpoczęto w chwili pierwszego uruchomienia po wymianie łożysk w silniku. Prowadzono systematyczne pomiary co 4 tygodnie, gdy stan silnika zaczął się pogarszać zwiększono częstotliwość pomiarów (co 2 tygodnie, a następnie co 1 tydzień). Pomiary wykonywano dla bardzo zbliżonych do siebie warunków pracy silnika, przy takim samym lub niewiele różniącym się obciążeniu.

Mierzono przyspieszenie drgań łożyska korzystając ze zmodyfikowanej metody detekcji obwiedni. Przedstawione na rys. 3. wielkości są zdefiniowane przez autora następująco:

$$L_{\text{PEAK}} = 20 \log \frac{A_{t\text{PEAK}}}{A_{o\text{PEAK}}}, \quad (1)$$

$$L_{\text{BPFO}} = 20 \log \frac{A_{t\text{BPFO}}}{A_{o\text{BPFO}}}, \quad (2)$$

$$L_{\text{FTF}} = 20 \log \frac{A_{t\text{FTF}}}{A_{o\text{FTF}}}, \quad (3)$$

$$L_{\text{BSF}} = 20 \log \frac{A_{t\text{BSF}}}{A_{o\text{BSF}}}, \quad (4)$$

$$L_{\text{BDFI}} = 20 \log \frac{A_{t\text{BDFI}}}{A_{o\text{BDFI}}}, \quad (5)$$

$$C_A = \frac{A_{\text{PEAK}}}{A_{\text{RMS}}}, \quad (6)$$

gdzie: L_{PEAK} – poziom wartości szczytowej przyspieszenia drgań łożyska.

L_{BPFO} – poziom składowej BPFO (uszkodzenie bieżni zewnętrznej) w widmie obwiedni przyspieszenia drgań.

C_A - współczynnik szczytu przyspieszenia drgań.

$A_{t\text{PEAK}}$ – wartość szczytowa przyspieszenia drgań dla chwili t .

$A_{o\text{PEAK}}$ – wartość szczytowa przyspieszenia drgań dla chwili $t=0$ (początek obserwacji).

$A_{t\text{BPFO}}$ – wartość skuteczna składowej w widmie detekcji obwiedni dla danej chwili t , związana z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej BPFO.

$A_{o\text{BPFO}}$ – wartość skuteczna składowej w widmie detekcji obwiedni dla danej chwili $t=0$, związana z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej BPFO. Podobnie można zdefiniować A_t i A_o dla innych uszkodzeń, otrzymamy wtedy możliwość wyznaczania L_{FTF} , L_{BSF} , L_{BPFI} .

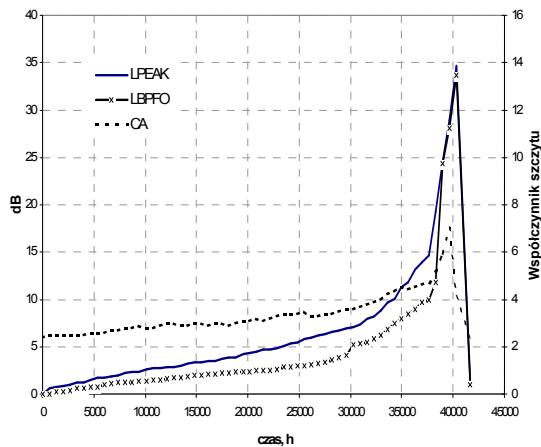
A_{PEAK} – wartość szczytowa przyspieszenia drgań.

A_{RMS} – wartość skuteczna przyspieszenia drgań.

Analiza wyników z detekcji obwiedni i interpretacja parametrów zaproponowanych przez autora pozwoliły podjąć decyzję o wymianie łożyska po upływie 40320 godzin pracy. Na podjęcie takiej decyzji wpływ miały następujące fakty:

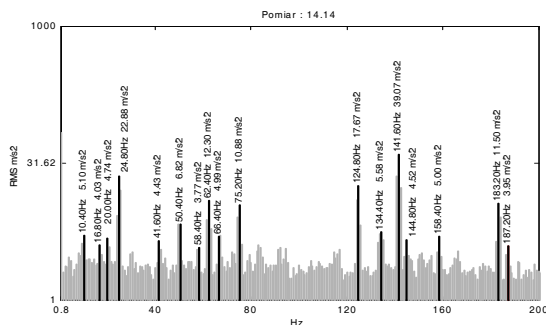
1. Wzrost L_{PEAK} od chwili $t=0$ o 34,7dB, po przekroczeniu 3700 godzin eksploatacji zaobserwowano wyraźny wzrost L_{PEAK} .

2. Wzrost L_{BPFO} od chwili $t=0$ o 33,76dB po przekroczeniu 3700 godzin eksploatacji zaobserwowano wyraźny wzrost L_{BPFO} , $BPFO=141,6\text{Hz}$.



Rys.3. Przebieg w czasie zmian L_{PEAK} , L_{BPFO} i C_A dla łożyska FAG NU 326 w silniku 800kW

3. Wzrost współczynnika szczytu C_A z 2,4 w chwili $t=0$ do 7, a następnie spadek jego wartości do 4,1.



Rys.4. Widmo detekcji obwiedni łożyska FAG NU 326, silnik 800kW

4. Pojawienie się w widmie detekcji obwiedni, a następnie wzrost z wartości $0,5\text{m/s}^2$ do wartości $5,1\text{m/s}^2$ składowej informującej o uszkodzeniu koszyka – rys. 4, FTF (10,4Hz),

5. W smarze pojawiły się części metaliczne widoczne najpierw pod mikroskopem, a następnie gołym okiem (elementy koszyka).

6. Pojawienie się w widmie detekcji obwiedni, a następnie wzrost z wartości $0,5\text{m/s}^2$ składowej informującej o uszkodzeniu elementu tocznego, BSF (62,4Hz).

7. Metoda SPM potwierdziła uszkodzenie łożyska. Analiza widma prądu stojana nie wskazywała na anomalie.

Decyzja o zatrzymaniu silnika i wymianie łożyska NU326 okazała się trafna. łożysko miało

poważne uszkodzenia bieżni zewnętrznej oraz uszkodzenia elementów tocznych koszyka.

3. Uwagi końcowe

Wieloletnie badania prowadzone w zespole autora potwierdzają przemysłową przydatność do diagnostyki łożysk tocznych w silnikach elektrycznych zmodyfikowanej detekcji obwiedni i metody SPM. Autor uważa również za konieczne prowadzenie częstych inspekcji jakości smarowania łożysk w silnikach.

4 Literatura

- [1]. Bernatt J., Bernatt M.: *Ekspertyzy i oceny przyczyn uszkodzeń silników elektrycznych dużej mocy – cz. 2*. Zeszyty Problemowe, Maszyny Elektryczne, nr 68, 2004.
- [2]. Drak B.: *Analiza awarii silników indukcyjnych dużej mocy*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 54, 1997.
- [3]. Dzierżanowski A., Szymaniec S.: *Diagnostyka węzłów łożyskowych w maszynach elektrycznych*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 61, 2000.
- [4]. SKF. *Katalog 2004*
- [5]. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: *Electrical insulation for rotating machines*. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004.
- [6]. Szymaniec S.: *Badania porównawcze wybranych metod diagnozowania węzłów łożyskowych silników elektrycznych*. Materiały Sympozjum "Mikromaszyny i serwonapędy" Kraków - Przegorzały 5-9.09.1994.

Autor

Dr inż. Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska.
Instytut Układów Elektromechanicznych
i Elektroniki Przemysłowej.
45-951 Opole ul. Luboszycka 7.
slawszym@po.opole.pl