

Grzegorz Gawor, Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

PRZEMYSŁOWE BADANIA DIAGNOSTYCZNE NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH

INDUSTRIAL DIAGNOSTICS OF ELECTRIC ELECTRICAL DRIVES

Abstract: There are many problems in practical diagnostics of machines operated in industrial conditions. The paper presents the diagnostic methods in this for example the envelope analysis methods and measurement results of operating diagnostics.

1. Wstęp

Zwiększenie wydajności pracy, zmniejszenie awaryjności oraz czasu przestojów maszyny to wymogi stawiane nowoczesnym układom napędowym. W ujęciu ogólnym silniki elektryczne, podobnie jak i inne maszyny, można eksploatować na 3 sposoby [2]:

- eksploatacja do wystąpienia awarii,
- eksploatacja planowo-zapobiegawcza,
- eksploatacja zależna od stanu maszyny.

Coraz częściej eksperci i inżynierowie przychylają się do stwierdzenia, iż eksploatacja zależna od stanu maszyny jest najlepszym i najbardziej ekonomicznym sposobem eksploatacji maszyny. Moment remontu nie jest z góry zaplanowany, a uzależniony jest jedynie od stanu technicznego maszyny. W trakcie pracy maszyny wykonuje się okresowe badania diagnostyczne, których analiza umożliwi indywidualną ocenę stanu technicznego maszyny. Badania te mają na celu stwierdzenie początku pojawienia się uszkodzenia, a następnie należy obserwować trendy i rozwój niepokojących zmian.

2. Problemy diagnostyczne w przemyśle

W praktycznej diagnostyce maszyn i urządzeń [1÷3] w warunkach przemysłowych występuje wiele problemów utrudniających prace diagnostyczne. Pojawiają się one już na etapie uzyskiwania sygnałów diagnostycznych (zarówno ich dostępności jak również występujących zakłóceń) [1]. Nie są to jedyne problemy, które występują w diagnostyce przemysłowej napędów elektrycznych. Uzyskane dane z sygnałów diagnostycznych często nie są jednoznaczne, co stwarza ogromne problemy w automatycznej interpretacji wyników pomiarów. Trzeba odpowiedzieć sobie na pytanie, czy zarejestrowany poziom sygnału świadczy o uszkodzeniu, chwi-

lowej niesymetrii zasilania, czy jest to po prostu zakłócenie. Brak wyników porównawczych na początku badania obiektu to kolejny problem. Powoduje to trudności w ocenie, czy stan obiektu ulega pogorszeniu, czy utrzymuje się na tym samym poziomie.

3. Diagnostyka uszkodzeń

Jako maszyny elektryczne napędzające inne urządzenia najczęściej stosowane są silniki elektryczne indukcyjne z wirnikiem klatkowym. Wynika to z kilku przyczyn: między innymi z racji przystępnej ceny, prostej budowy i stosunkowo dużej niezawodności. Szczególne miejsce zajmują tutaj silniki na napięcie 6 kV - silniki wysokonapięciowe (WN), które stanowią w większości napęd w najważniejszych zespołach maszynowych [2]. Diagnostyka tych silników jest jednym z najważniejszych zadań dla służb technicznych w każdym zakładzie przemysłowym. Ich praca powinna być niezawodna, a stan techniczny nie powinien budzić zastrzeżeń [3].

3.1 Diagnostyka klatek w oparciu o sygnał prądowy

Uszkodzenia klatki wirnika silnika znajdują swoje odzwierciedlenie w prądzie stojana. Autorzy do diagnostyki klatek silników wykorzystują najczęściej zestaw pomiarowy złożony z cewki Rogowskiego, integratora oraz analizatora. Znakomita większość diagnostów w tym firmowe systemy diagnostyczne diagnozują klatkę silników analizując widmo prądu głównie wokół 50Hz (częstotliwość zasilania). Autorzy diagnozują w oparciu o częstotliwości diagnostyczne f_k informujące o uszkodzeniu klatki określone ogólnie wzorem:

$$f_k = f_l [(6k \pm 1) - (6k \pm 2l) s] \quad (1)$$

gdzie: f_1 – częstotliwość zasilania, $k, l = 0, 1, 2, \dots$
 dla pierwszych wyrazów tego szeregu
 otrzymamy częstotliwości diagnostyczne:
 -dla otoczenia 1-wszej harmonicznej zasilania:

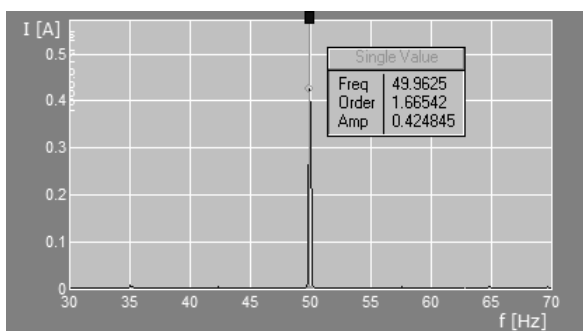
$$f_1 (1 \pm 2s), f_1 (1 \pm 4s), f_1 (1 \pm 6s), \quad (2)$$

-dla otoczenia 5-tej harmonicznej zasilania:

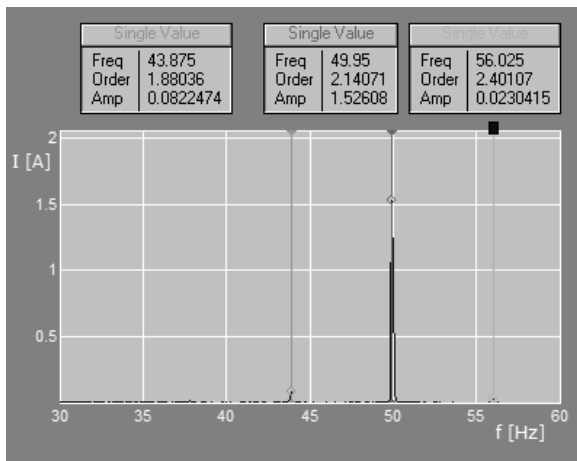
$$f_1 (5-2s), f_1 (5-4s), f_1 (5-6s), f_1 (5-8s) \quad (3)$$

-dla otoczenia 7-mej harmonicznej zasilania

$$f_1 (7-4s), f_1 (7-6s), f_1 (7-8s), f_1 (7-10s) \quad (4)$$



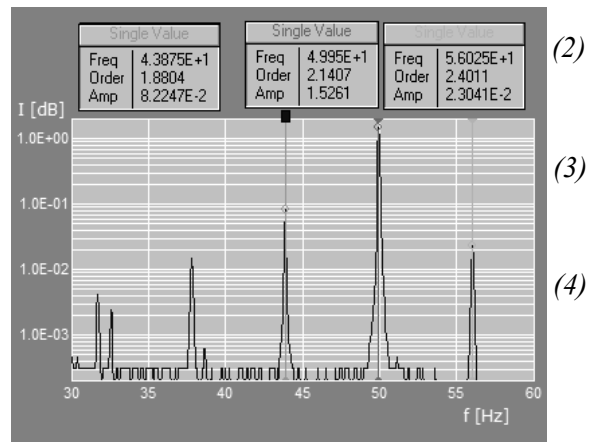
Rys. 1. Widmo prądu stojana nieuszkodzonego silnika



Rys. 2. Widmo prądu stojana silnika z uszkodzoną klatką

Analiza widma prądu w obszarze tych harmonicznych jest wskazana w szczególności, gdy silnik jest słabo obciążony (poniżej $0.5s_n$), a tak często bywa w warunkach przemysłowych. Wtedy częstotliwości poślizgowe wokół f_1 mogą nie być wyraźnie wyróżnione i diagnoza może być niepewna. Wówczas o wyniku diagnozy przesądza analiza widma prądu w otoczeniu 5-tej i 7-mej harmonicznej. Dla lepszego uwidocznienia częstotliwości diagnostycznych warto wykonać procedurę powię-

kszenia (ZOOM) dla częstotliwości zasilania, oraz 5-tej i 7-mej harmonicznej. Pomocnym może być też wykonanie szybkiej transformacji Fouriera.



Rys. 3. Widmo prądu stojana silnika (FFT)

3.2 Diagnostyka łożysk tocznych w oparciu o sygnał drganiowy

Uszkodzenie łożyska znajduje swoje odzwierciedlenie zarówno w widmie prądu stojana, jak również w widmie drgań silnika. Dla monitorowania stanu łożysk autorzy wykorzystują zestaw pomiarowy złożony z akcelerometru oraz analizatora. Czujnik drgań – akcelerometr, należy umieszczać w strefie jak największego obciążenia zwanego oknem emisji łożyska [2].



Rys. 4. Przykładowe usytuowanie czujnika drgań podczas diagnostyki łożysk tocznych.

Znając geometrię łożyska, ilość elementów tocznych oraz częstotliwość obrotową wału, można obliczyć częstotliwości charakterystyczne drgań dla uszkodzenia poszczególnych elementów łożyska. Częstotliwości te można obliczyć w oparciu o zależności [2]:

- dla defektu koszyka:

$$f_k = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (5)$$

- dla defektu elementu tocznego:

$$f_{ET} = f_r \frac{PD}{BD} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (6)$$

- dla defektu bieżni zewnętrznej:

$$f_{BZ} = f_r \frac{n_k}{2} \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (7)$$

- dla defektu bieżni wewnętrznej:

$$f_{BW} = f_r \frac{n_k}{2} \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (8)$$

gdzie:

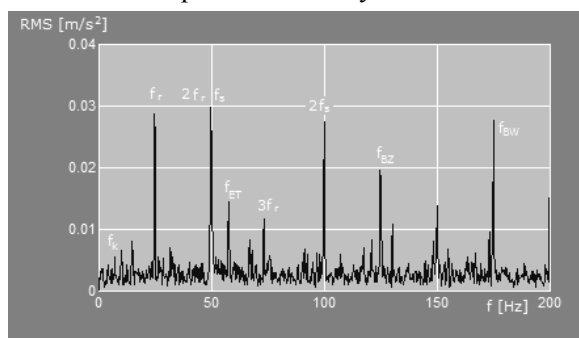
n_k – liczba elementów tocznych,

f_r – częstotliwość obrotowa, odpowiadająca prędkości obrotowej silnika (wału),

β – kąt pracy łożyska,

BD – średnica elementu tocznego (kulki),

PD – średnica podziałowa łożyska.



Rys. 5. Widmo detekcji obwiedni łożyska FAG NU320, silnik 160kW

Na powyższym widmie kolejne dominanty mają częstotliwości:

$$f_k=10,2\text{Hz}, f_r=24,8\text{Hz}, 2f_r=49,6\text{Hz}, f_s=50\text{Hz}, \\ f_{ET}=57,8\text{Hz}, 3f_r=74,4\text{Hz}, 2f_s=100\text{Hz}, \\ f_{BZ}=124,8\text{Hz}, f_{BW}=173,5\text{Hz}$$

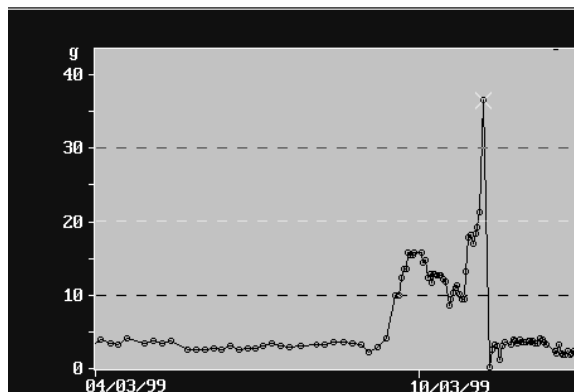
W zakładach przemysłowych najbardziej rozpowszechniony jest system okresowych pomiarów diagnostycznych łożysk tocznych off-line i on-line prowadzonych cyklicznie wg harmonogramu, który obejmuje:

- Pomiar drgań węzłów łożyskowych i całego napędu.
- Pomiar temperatury w węzłach łożyskowych.
- Ocenę stanu smarowania łożysk.

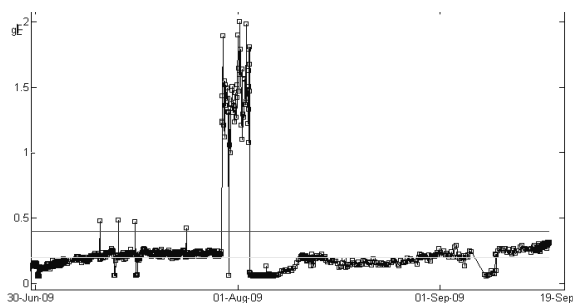
Pomiary wykonują najczęściej specjaliści z wydziałów diagnostyki lub innych wydziałów utrzymania ruchu. W ocenie własnej najlepszymi metodami diagnozowania łożysk tocznych w silnikach elektrycznych w warunkach krajowych są:

1. Metoda detekcji obwiedni, w tym metoda zmodyfikowana.
2. Metoda SPM pod warunkiem specjalnego przygotowania punktu pomiarowego.

W krajach o bardzo wysokiej kulturze technicznej metody wymienione wyżej są uzupełniane metodami wysokoczęstotliwościowymi – SE, SEE, HFD, EA [2]. W urządzeniach przemysłowych wyprodukowanych przez firmy amerykańskie można spotkać wyposażenie węzłów łożyskowych w czujniki drgań do metody REBAM. Wszystkie wymienione metody mogą być z dobrym skutkiem wykorzystane pod warunkiem właściwego przygotowania punktów pomiarowych. Zasady wykonywania pomiarów diagnostycznych oraz stosowne kryteria oceny stanu technicznego łożysk tocznych w oparciu o wymienione metody przedstawiono w monografii [2]. Stosowanie tych metod wymaga posiadania sprzętu pomiarowego typu analizator drgań wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem. Sprawdzenie stanu technicznego łożysk tocznych polega na porównaniu bieżących pomiarów z pewnym poziomem odniesienia oraz poziomem granicznym określanym jako maksymalny dopuszczalny. Niestety w wielu krajowych zakładach przemysłowych, zwłaszcza w tych mniejszych, pomiary diagnostyczne łożysk tocznych w silnikach elektrycznych sprowadzają się do oceny łożysk w oparciu o ogólne wytyczne norm drganiowych dla silników (pomiar prędkości drgań do 1 kHz). Postępowanie takie uniemożliwia racjonalną eksploatację silników, nie daje możliwości wczesnego wykrycia anomalii w pracy łożysk. Na rys. 6 i 7 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów drgań z monitoringu stanu łożysk tocznych metodą detekcji obwiedni. W widmie obwiedni obok wymienionych wyżej składowych mogą wystąpić również składowe: obrotowa f_r i 2-ga harmoniczna częstotliwości zasilania $2f_r=100$ Hz jako efekt modulacji tymi składowymi pozostałych składowych sygnału drganiowego węzłów łożyskowych. Przyczyną bezpośrednią występowania w widmie obwiedni wymienionych składowych jest niesymetria szczeliny powietrznej silnika spowodowana luzami w tarczach łożyskowych, luzami w zamkach, niecentrycznościami wirnika i stojana, ugięciami wirnika, niewłaściwą centrówką napędu itd. W maszynie elektrycznej możemy wyróżnić dwa rodzaje niesymetrii wewnętrznych:



Rys. 6. Wyniki pomiarów przyspieszenia drgań w monitoringu łożyska 6326 w przykładowym silniku



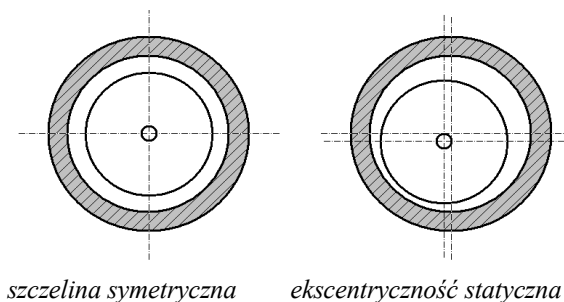
Rys. 7. Trend składowej dla defektu bieżni ze-wnętrznej dla łożyska 22244 w przykładowym silniku

- niesymetrię elektryczną, która jest spowodowana niesymetrycznym rozłożeniem i połączeniem poszczególnych części uzwojenia na obwodzie maszyny przy zachowaniu stałej szczeliny powietrznej.

- niesymetrię magnetyczną, która jest spowodowana niesymetryczną szczeliną powietrzną pomiędzy stojanem i wirnikiem.

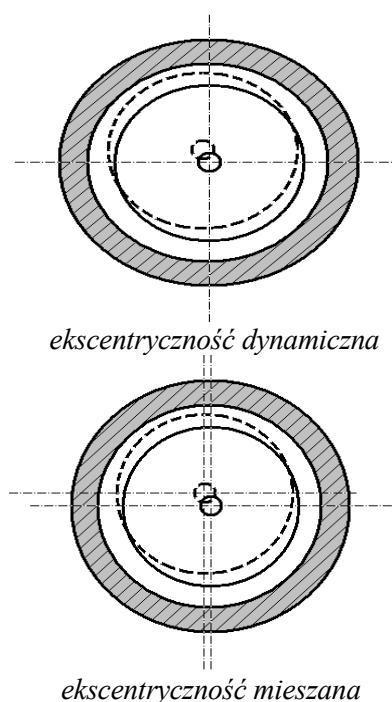
Skutkiem niesymetrii elektrycznej jest pojawienie się szeregu składowych harmonicznych przepływu i odpowiadającego mu szeregu harmonicznego przestrzennego rozkładu indukcji magnetycznej wzdłuż szczeliny. Skutki niesymetrii magnetycznej są bardziej złożone, gdyż każdej składowej harmonicznej przepływu w maszynie odpowiada szereg harmonicznych przestrzennego rozkładu indukcji magnetycznej. Nierównomierna - niesymetryczna szczelina powietrzna pomiędzy stojanem, a wirnikiem może powstać ze względów technologicznych lub eksploatacyjnych. Wyróżniamy zasadniczo dwa rodzaje niesymetrii szczeliny: niesymetrię statyczną i niesymetrię dynamiczną. W praktyce występują obydwie jednocześnie i wtedy mówimy o niesymetrii mieszanej. Istotą niesymetrii

szczeliny poglądowo przedstawiono na rys. 8 i rys. 9.



szczelina symetryczna ekscentryczność statyczna

Rys. 8. Silnik ze szczeliną symetryczną i z ekscentrycznością statyczną, rys. uproszczony



ekscentryczność dynamiczna

ekscentryczność mieszana

Rys. 9. Silnik z ekscentrycznością dynamiczną i z ekscentrycznością mieszaną, rys. uproszczony

W przypadku niesymetrii statycznej środek geometryczny wirnika nie porusza się względem środka geometrycznego stojana - szerokość szczeliny powietrznej jest funkcją tylko współrzędnych geometrycznych i nie zależy od czasu. Przy wystąpieniu niesymetrii dynamicznej szerokość szczeliny powietrznej jest funkcją zarówno współrzędnych geometrycznych jak i czasu. Nie wglębiając się w zagadnienia natury teoretycznej, a skupiając się na zagadnieniach praktycznych, można stwierdzić, że wystąpienie w silniku niesymetrii szczeliny prowadzi do powstania lub pogłębienia sił naciągu magnetycznego, które to siły mogą przyjmować wartości rzędu ciężaru wirnika. Działają one bardzo destrukcyjnie na silnik, wywołują

wzrost drgań maszyny elektrycznej, przyczyniają się do szybkiego zużycia łożysk, mogą spowodować ugięcie wału. Spotkać można również przypadki przystarcia wirnika o stojan, w szczególności w czasie rozruchu. Od lat prowadzone są badania nad opracowaniem efektywnych metod diagnozowania maszyn elektrycznych pod kątem określenia stopnia niesymetrii szczeliny. Autorzy artykułu również nad tym pracuje. Metody diagnostyczne niesymetrii szczeliny wykorzystują fakt wystąpienia deformacji pola w szczelinie. Jednym z jego przejawów jest wystąpienie w polu elektromagnetycznym harmonicznych, określonych następującymi zależnościami:

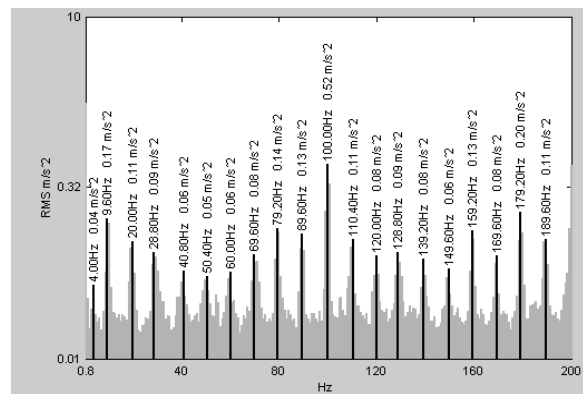
$$f_{n1} = f_1 [(n_{rt} z_2 + n_d) \frac{1-s}{p} + n_{ws}] \quad (9)$$

$$f_{n1} = f_1 [(n_{rt} z_2 \pm n_d \pm n_{or} p) \frac{1-s}{p} \pm n_{wr} s] \quad (10)$$

gdzie: f_1 - częstotliwość sieci zasilającej,
 n_{rt} - dowolna liczba całkowita,
 z_2 - liczba żłobków wirnika,
 n_d - rząd niesymetrii - dla statycznej $n_d = 0$, dla dynamicznej $n_d = 1, 2, 3$,
 s - poślizg maszyny,
 p - liczba par biegunów,
 n_{ws} - numer składowej harmonicznej czasowej siły magnetomotorycznej stojana,
 n_{wr} - numer składowej harmonicznej czasowej siły magnetomotorycznej wirnika,
 n_{or} - numer składowej harmonicznej przestrzennej wirnika.

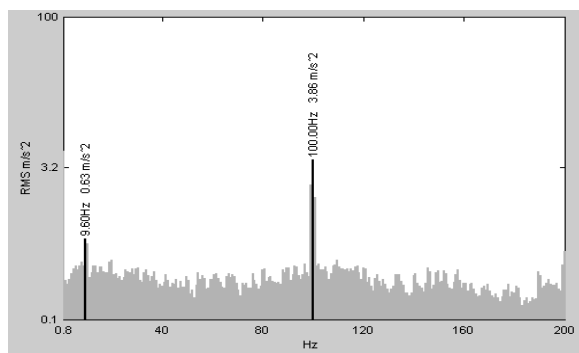
Można prowadzić diagnostykę maszyny elektrycznej mierząc i analizując jej drgania wywołane niesymetrią szczeliny, czyli skutki pojawienia się harmonicznych określonych wzorami 9 i 10. Jest to bardzo uciążliwe postępowanie. Autorzy artykułu stosują pewną modyfikację metody drganiowej [2, 3]. Analizie poddawane jest widmo obwiedni sygnału drganiowego węzłów łożyskowych podczas procedury diagnozowania łożysk tocznych. Metoda diagnozowania może polegać również na pomiarze współczynnika głębokości modulacji głównych składowych widma drgań pochodzenia elektromagnetycznego. Inną metodą stosowaną również przez autorów jest metoda oparta o analizę prądu silnika. Praktyka dowodzi, że w każdym silniku występuje niesymetria szczeliny z racji niedo-

skonałości procesu jego wytwarzania, mało precyzyjnego montażu oraz nieidealnych warunków jego eksploatacji. Zadaniem diagnostyki jest przede wszystkim odpowiedź na pytanie czy wzrost drgań silnika, bądź anomalie drganiowe są spowodowane niesymetrią szczeliny silnika. Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na bardzo osobliwy aspekt praktyczny zagadnienia niesymetrii szczeliny powietrznej pomiędzy stojanem a wirnikiem w silniku elektrycznym. Występuje tu pewnego rodzaju „dwoistość”. Niesymetria szczeliny może być zjawiskiem pierwotnym, wtórnym lub zarówno pierwotnym jak i wtórnym. Zjawiskiem pierwotnym jest wtedy, gdy od początku silnik ma technicznie znaczącą niesymetrię np. niekołowy kształt otworu stojana bądź przekroju poprzecznego wirnika itp. Wówczas niesymetria wywołuje szybką degradację łożysk, sprzęgła pogorszenie osiowania całego zespołu maszynowego. Możliwa i równie częsta jest sytuacja odwrotna, a mianowicie: złe wyosiowanie zespołu maszynowego, uszkodzone łożysko itp. powoduje wystąpienie niesymetrii szczeliny w silniku, a w konsekwencji wystąpienie sił naciągu magnetycznego prowadzących do dalszej destrukcji silnika i zespołu maszynowego. Możliwy jest również wariant

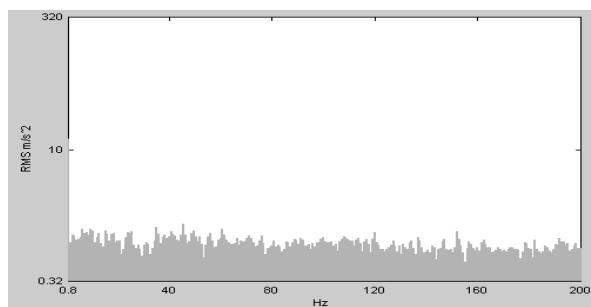


Rys. 10. Widmo detekcji obwiedni węzła łożyskowego, silnik o mocy 800 kW, przed wymianą łożyska. Widmo detekcji świadczy o poważnym uszkodzeniu łożyska oraz o niesymetrii szczeliny. Zalecenia: wymiana łożysk, wymiana tarcz łożyskowych, legalizacja tarcz, pomiar luzów

trzeci, mieszany to znaczy, że na początku występują czynniki pierwotny i wtórny. Dla zilustrowania możliwości diagnostyki w oparciu o zmodyfikowaną metodę detekcji obwiedni węzła łożyskowego silnika o mocy 800 kW, w którym wystąpił defekt łożyska i niesymetria szczeliny, na rys. 10÷12 przedstawiono wyniki pomiarów diagnostycznych wraz z komentarzem.



Rys. 11. Widmo detekcji obwiedni węzła łożyskowego, silnik o mocy 800 kW, po wymianie łożysk, niestety pomimo zaleceń nie wymieniono tarcz łożyskowych, nie wykonano legalizacji tarcz. Widmo detekcji świadczy o niesymetrii szczeliny, na skutek wymiany łożysk i prac z tym związanych, niesymetria szczeliny pogłębiła się. Zalecenia: wymiana tarcz łożyskowych, legalizacja tarcz, pomiary luzów



Rys. 12. Widmo detekcji obwiedni węzła łożyskowego, silnik o mocy 800 kW, po wymianie łożysk oraz wymianie tarcz łożyskowych. Pomiary luzów nie wykazały odchyłek od normy

4. Uwagi końcowe

Diagnostyka w przemysłowych układach napędowych jest technicznie możliwa i ekonomicznie uzasadniona. Najczęściej stosowana jest diagnostyka eksploatacyjna okresowa. Analiza pomiarowych wyników diagnostycznych powinna decydować o dalszych losach napędu, jego dalszej eksploatacji, bądź skierowaniu go do przeglądu lub remontu. W przemysłowych układach napędu elektrycznego najpowszechniej stosuje się maszyny indukcyjne klatkowe. W przypadku odpowiedzialnych układów napędowych dużej mocy są to zwykle silniki klatkowe wysokonapięciowe. Prowadzone przez autorów badania diagnostyczne potwierdzają przydatność w ocenie stanu silnika widma prądu stojana, jak również sygnału drganiowego. Szybkie wykrycie uszkodzenia silnika pozwala zaplanować naprawę, przez co zmniej-

sza się czas naprawy, jak również straty związane z przestojem maszyny.

5. Literatura

- [1]. Dybowski P., Rams W., Rusek J.: *Problemy praktycznej diagnostyki maszyn indukcyjnych w przemyśle*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 76/2007.
- [2]. Szymaniec S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie, z. 193. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2006. Opole.
- [3]. Szymaniec S.: *Diagnostyka w przemysłowych napędach elektrycznych*. Napędy i Sterowanie 04/2009.

Autorzy

Mgr inż. Grzegorz Gawor
Doktorant
Politechnika Opolska.
Wydział Elektrotechniki, Automatyki
i Informatyki.

Dr hab. inż. Sławomir Szymaniec prof. PO
Politechnika Opolska.
Wydział Elektrotechniki, Automatyki
i Informatyki.
Instytut Układów Elektromechanicznych
i Elektroniki Przemysłowej.
45-951 Opole ul. Luboszycka 7.
s.szymaniec@po.opole.pl