

Diagnostyka drganiowa łożysk tocznych na przykładzie silnika zespołu wentylatora młynowego

MGR INŻ. MAREK RZEPIELA
P.H.U. Polidiag
www.wibrodiagnostyka.eu

W czasie eksploatacji maszyn łożyska toczne należą do najczęściej wymienianych elementów – są one bowiem najbardziej narażone na obciążenia. To właśnie uszkodzenia węzłów łożyskowych są najczęstszą przyczyną awarii maszyn. Uzupełniające się metody diagnostyczne opisane w niniejszym artykule pozwalają w poprawny sposób ocenić stan techniczny łożysk tocznych maszyn.



Mgr inż. Marek Rzepiela

Od 1993 r. związany z diagnostyką wibracyjną. Na co dzień pracuje w jednej z większych elektrowni w Polsce. Bogate doświadczenie i wiedzę ekspercką wykorzystuje w realizacji badań technicznych i prowadzeniu szkoleń firmowanych w zakresie własnej działalności.

Ocena stanu dynamicznego węzłów łożyskowych jest podstawą optymalnej i prawidłowej eksploatacji maszyn. Defekty łożyska tocznego objawiają się ubytkiem lub zniekształceniem jego masy, co w konsekwencji prowadzi do całkowitego zniszczenia łożyska. Defekty te to korozja bieżni lub elementów tocznych, zatarcie, złuszczenie, nierówność powierzchni tocznej itp. Mogą one powstać nie tylko na skutek nadmiernego obciążenia łożysk czy starzenia się jego elementów, ale także w wyniku niewłaściwego montażu łożyska lub jego smarowania. Dlatego układ wał maszyny wirującej – łożysko jest najbardziej odpowiedzialnym zespołem odzwierciedlającym stan dynamiczny maszyny. Monitorowanie stanu dynamicznego węzłów łożyskowych umożliwia prowadzenie remontów uwarunkowanych stanem maszyny i zaniechanie remontów zapobiegawczych uwarunkowanych czasem oraz remontów powarynkowych.

Najwcześniejsze rozpoznanie zmian stanu dynamicznego węzłów łożyskowych dają systemy monitorujące ich stan techniczny poprzez pomiar drgań. Dobrze zaprojektowana maszyna charakteryzuje się niskim poziomem drgań

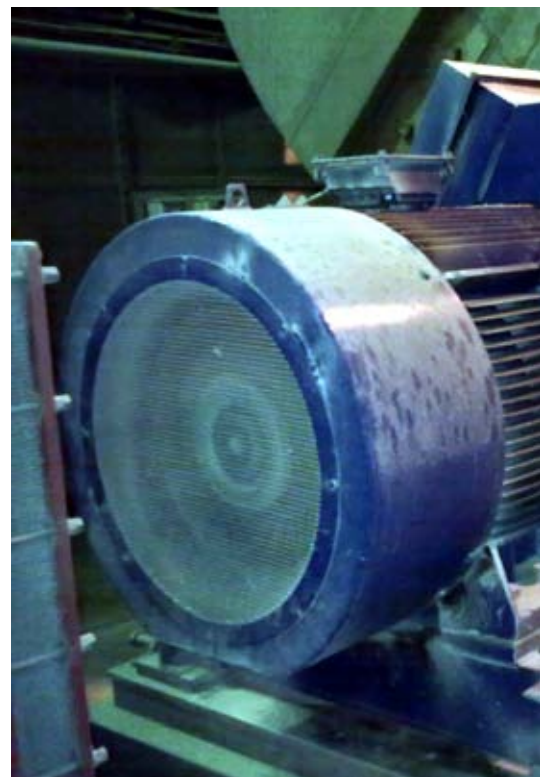
węzłów łożyskowych. Sygnał drganiowy niesie wiele informacji związanych ze stanem technicznym maszyn i jest podstawą do wykorzystania ciągłego monitorowania tych sygnałów jako wskaźnika trendu stanu dynamicznego maszyny i wskaźnika potrzeby remontu. Analiza widmowa tych sygnałów pozwala na identyfikację rodzaju uszkodzenia. Poziom drgań uszkodzonych łożysk rośnie wraz z jego zużyciem.

Pomiary ogólnego poziomu drgań węzłów łożyskowych

Badaniom poddany był zespół wentylatora młynowego (rys. 1). Dane silnika: moc znamionowa silnika 850 kW, posadowienie sztywne (na litym betonowym fundamencie), obroty 1494 obr./min, łożysko od strony napędowej typu FAG 6326 C3, od strony przeciwnapędowej FAG NU222E. Pomiar drgań węzłów łożyskowych jest tak powszechnie i szeroko stosowany do oceny ich stanu, że diagnostyka łożysk tocznych utożsamiana jest często z diagnostyką drganiową łożysk. Rozwój elektronicznego sprzętu pomiarowego i rosnąca baza informacji diagnostycznych sprawiają, że diagnostyka drganiowa jest skutecznym narzędziem wykrywania defektów łożysk

tocznych. Najprostszą metodą diagnostowania łożysk są okresowe lub ciągłe pomiary ogólnych poziomów drgań. Pomiary te bazują na śledzeniu tendencji zmian poziomu drgań w szerokich pasmach częstotliwości (2 Hz ÷ 10

Rys. 1. Obiekt badań diagnostycznych



kHz) w czasie. Podczas rutynowych pomiarów drgań wg „Harmonogramu pomiarów drgań” zarejestrowano wzrost poziomów przyspieszeń oraz prędkości drgań na ułożyskowaniu silnika od strony przeciwnapędowej w kierunkach pomiarowych poziomym, pionowym oraz osiowym (rys. 2). Łożysko od strony przeciwnapędowej to FAG NU222E. Wzrost poziomu prędkości drgań przedstawiono na trendzie w miejscu kursora (rys. 3). Zarejestrowane poziome prędkości drgań węzłów łożyskowych porównano z wartościami granicznymi drgań podanymi przez normy międzynarodowe ISO 10816 (rys. 4).

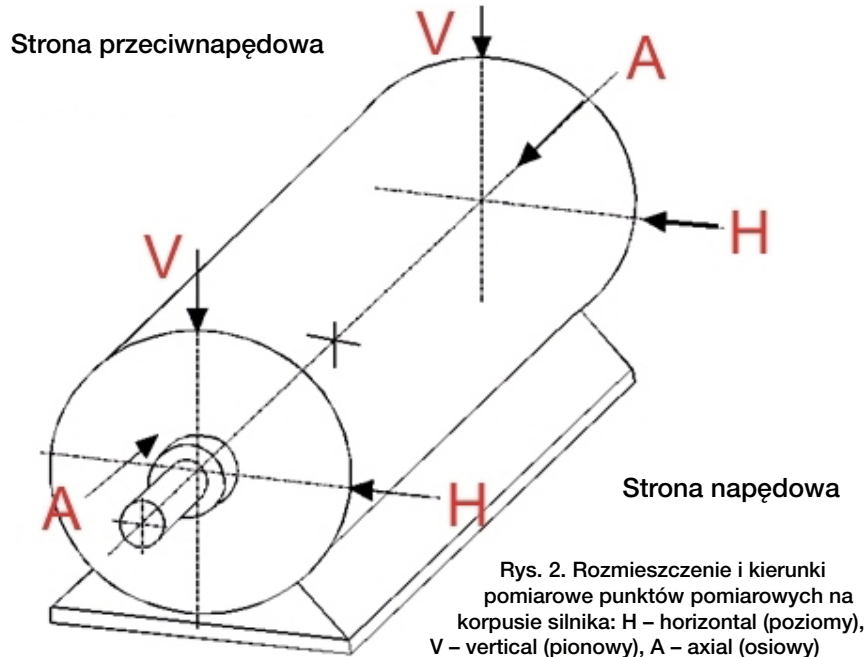
Kontrola temperatury łożysk

Podwyższenie temperatury łożyska świadczy zazwyczaj o zakłóceniach w jego pracy. Przegrzanie łożysk może wynikać z niewłaściwego doboru środka smarnego.

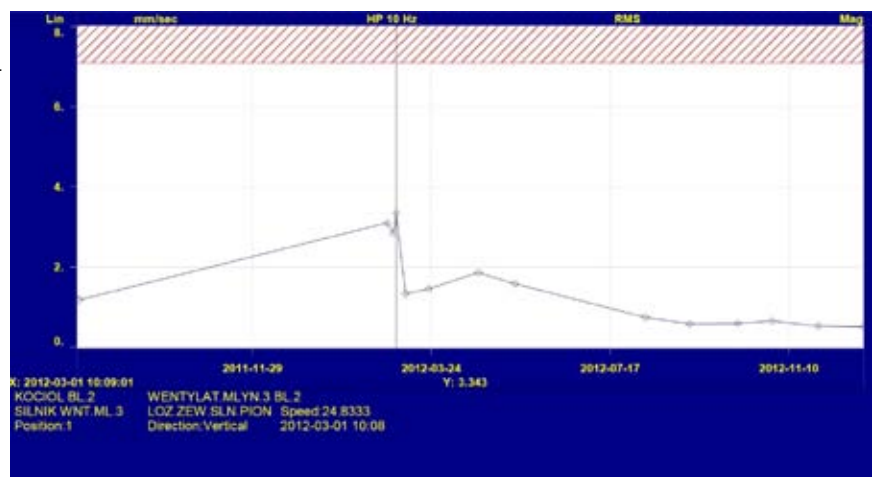
Innymi przyczynami wysokiej temperatury łożysk w trakcie ich eksploatacji mogą być:

- ▶ nadmierne lub niedostateczne smarowanie,
- ▶ zanieczyszczenie środka smarnego,
- ▶ przeciążenie,
- ▶ uszkodzenie łożyska,
- ▶ mały luz łożyskowy,
- ▶ tarcie w uszczelnieniach,
- ▶ zbyt silne zaciśnięcie łożyska.

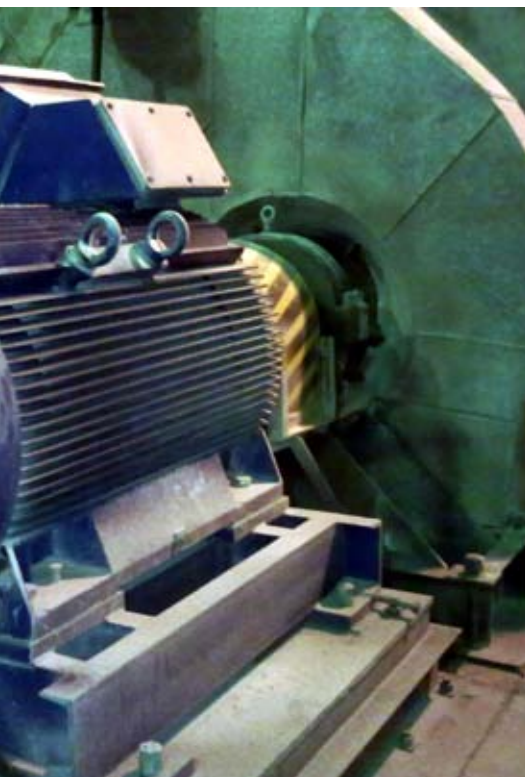
Wysoka temperatura łożyska negatywnie oddziałuje na środek smarny. Konieczny jest więc pomiar temperatury łożysk w czasie eksploatacji maszyny, najlepiej przez zainstalowanie czujników do pomiaru temperatury.



Rys. 2. Rozmieszczenie i kierunki pomiarowe punktów pomiarowych na korpusie silnika: H – horizontal (poziomy), V – vertical (pionowy), A – axial (osiowy)



Rys. 3. Trend prędkości drgań łożyska silnika od strony przeciwnapędowej w kierunku pomiarowym pionowym



RAPORT POMIARÓW

Punkt pomiarowy	Jednostka	Detekcja	Organia	Data/Czas	Ocena ISO10816
KOCIOŁ BL.2 WENTYLAT.MLYN.3 BL.2					
SILNIK WNT.ML.3					
ŁOŻ.ZEW.SLN.POZ.	mm/sec	RMS	2.8946	2012-03-01 10:08	Dopuszczalny
ŁOŻ.ZEW.SLN.PION	mm/sec	RMS	3.343	2012-03-01 10:09	Dopuszczalny
ŁOŻ.ZEW.SLN.OS	mm/sec	RMS	1.86556	2012-03-01 10:09	Dobry
ŁOŻ.WEW.SLN.POZ.	mm/sec	RMS	1.4284	2012-03-01 10:09	Dobry
ŁOŻ.WEW.SLN.PION	mm/sec	RMS	1.09987	2012-03-01 10:10	Dobry
ŁOŻ.WEW.SLN.OS	mm/sec	RMS	1.4362	2012-03-01 10:10	Dobry

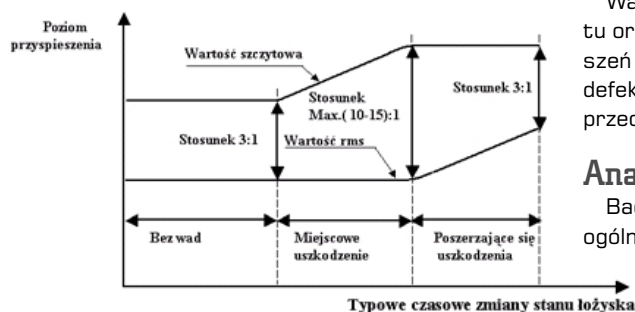
Rys. 4. Porównanie prędkości drgań z wartościami granicznymi normy ISO 10816 (grupa 1 – posadowienie sztywne)

Temperatura obudowy łożyska silnika od strony napędowej przed wymianą silnika wynosiła 45°C, po wymianie łożyska 43°C.

Temperatura obudowy łożyska silnika od strony przeciwnapędowej przed wymianą silnika wynosiła 56°C, po wymianie łożyska 42°C. Podwyższona temperatura może być wynikiem degradacji łożyskowania.

Pomiar współczynnika szczytu

Współczynnik szczytu jest stosunkiem wartości szczytowej sygnału drganiowego do jego wartości skutecznej w danym przedziale częstotliwości drgań. Wartość współczynnika szczytu może być wyznacznikiem stanu łożyska tocznego. Najczęściej metoda ta opiera się na pomiarach przyspieszenia drgań i podobnie jak w metodzie poprzedniej – istotna jest zmiana współczynnika szczytu w czasie eksploatacji maszyny (rys. 5).



Rys. 5. Wartość współczynnika szczytu wyznaczona dla łożyska tocznego w czasie eksploatacji maszyny

Wzrost współczynnika szczytu wskazuje na pogorszenie stanu łożyska tocznego, jednak w ostatniej fazie uszkodzenia jego wartość maleje. Przedstawiona metoda oceny stanu łożyska tocznego poprzez rejestrację współczynnika szczytu podobnie jak poprzednia ocenia stan łożyska, ale nie lokalizuje jego przyczyny (rys. 6). Zaletą jej jest jednak szybkość, prosty i łatwy w obsłudze pomiar. Skuteczność metody maleje, gdy w pobliżu badanego węzła łożyskowego występują inne źródła sygnałów impulsowych.

Współczynniki szczytu dla łożyska od strony przeciwnapędowej wyniosły:

$$47 : 11 = 4,27$$

$$62 : 16,6 = 3,73$$

Współczynniki szczytu dla łożyska od strony napędowej wyniosły:

$$8,86 : 6,27 = 1,41$$

$$9,83 : 6,95 = 1,41$$

Wartości współczynników szczytu oraz wysokie wartości przyspieszeń wskazują na występowanie defektów łożyska silnika od strony przeciwnapędowej.

Analiza widmowa drgań

Badania stałe lub okresowe ogólnego poziomu drgań dają jedynie informację o ogólnym stanie technicznym węzła łożyskowego, a nie o stanie poszczególnych jego elementów. W celu zba-

dania przyczyn złego stanu dynamicznego i stopnia zaawansowania poszczególnych uszkodzeń badanej maszyny należy prowadzić analizę częstotliwościową jej drgań. Analiza częstotliwościowa (widmowa) rozkłada sygnał drganiowy na składniki o różnych częstotliwościach. Wzrost poziomów składowych częstotliwości oraz same częstotliwości dostarczają informacji, które części maszyny ulegają powiększającym się usterkom. Usterki, takie jak np. niewyważenie wirnika, niewspółosiowość wałów maszyn, defekty łożysk, uszkodzenie zęba koła zębatego itp., są w trakcie pomiarów odzwierciedlone w postaci charakterystycznych częstotliwości widma drgań. Śledzenie składowych częstotliwości sygnału drgań w funkcji czasu w kolejnych pomiarach okresowych umożliwia identyfikację i kontrolę danego uszkodzenia. W miarę powstawania mikro-uszkodzeń łożyska pasmo drgań zawęża się w okolicy częstotliwości drgań elementów łożyska. Na tle tego szumu pasmowego pojawiają się wysokie impulsy. Pod koniec tej fazy szczytowe przyspieszenie drgań obudowy łożyska może sięgać 40 m/s² i powinno być sygnałem do planowej wymiany łożyska.

W widmach prędkości drgań łożyska silnika od strony przeciwnapędowej zarejestrowano występowanie drgań dla wyższych częstotliwości. Stan taki sugerował, że częstotliwości te mogą być generowane przez ruch obrotowy elementów tocznych tego łożyska (rys. 7). Po wymianie łożyska drgania dla tych częstotliwości nie występowały (rys. 8).

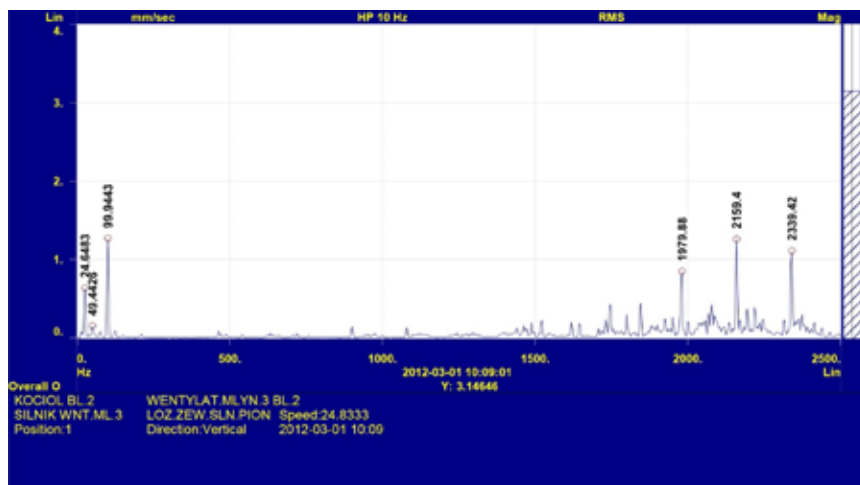
Metoda analizy obwiedni

Analiza obwiedni sygnału polega na tym, że sygnał drganiowy wychodzący z przetwornika po wstępnej filtracji wykorzystującej rezonans własny przetwornika podlega demodulacji, a następnie wyznaczane jest widmo pozostałej obwiedni sygnału. Tak wyznaczone widmo sygnału drganiowego może zawierać częstotliwości drgań odpowiadające defektom elementów łożyska. Przedstawiona metoda polega na specyficznej analizie drgań rezonansowych maszyny. Krótkotrwałe impulsy – uderzenia widoczne w przebiegach czasowych sygnału drganiowego węzłów łożyskowych – mogą być spowodowane uszkodzeniem elementu tocznego koszyka lub przejściem elementu tocznego przez punktowe uszkodzenie bieżni łożyskowej. Znając geometrię łożyska, liczbę elementów tocznych i liczbę obrotów bieżni wewnętrznej względem bieżni zewnętrznej, można wyznaczyć częstotli-

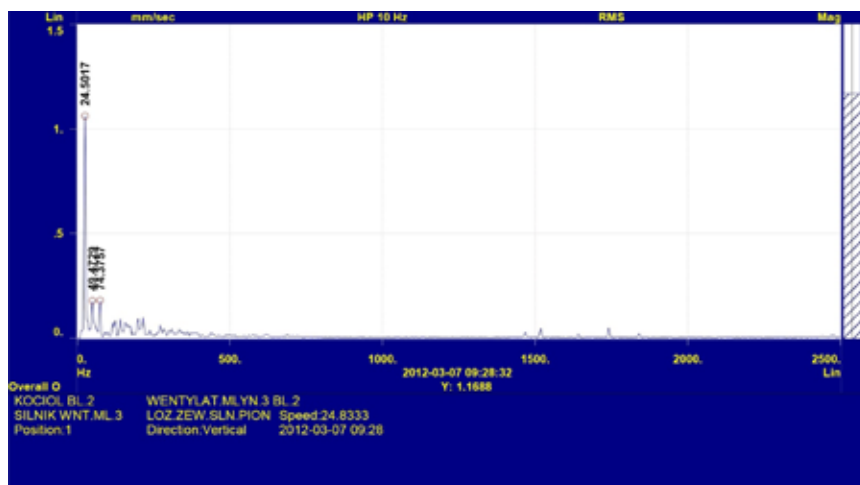
RAPORT POMIARÓW

Punkt pomiarowy	Jednostka	Defekcja	Ostatnio	Teraz	Zmiana%	Data/Czas
			2012-03-01	2012-03-07		
			przed wymianą	po wymianie		
KOCIOŁ BL.2 WENTYLAT. MLN.3 BL.2						
SIŁNIK WNT.ML.3						
ŁOŻ.ZEW.SLN.POZ.	mm/sec	RMS	2.89	2.56	-11.73	2012-03-07 09:28
ŁOŻ.ZEW.SLN.POZ.	m/s ²	Peak	47.	5.92	-84.01	2012-03-07 09:28
ŁOŻ.ZEW.SLN.POZ.	m/s ²	RMS	11.	4.19	-64.01	2012-03-07 09:28
ŁOŻ.ZEW.SLN.PION.	mm/sec	RMS	3.34	1.32	-60.41	2012-03-07 09:28
ŁOŻ.ZEW.SLN.PION.	m/s ²	RMS	16.6	3.71	-90.63	2012-03-07 09:28
ŁOŻ.ZEW.SLN.PION.	m/s ²	Peak	62.	5.25	-90.63	2012-03-07 09:28
ŁOŻ.ZEW.SLN.OS.	mm/sec	RMS	1.87	1.41	-24.53	2012-03-07 09:29
ŁOŻ.WEW.SLN.POZ.	mm/sec	RMS	1.43	2.5	74.88	2012-03-07 09:29
ŁOŻ.WEW.SLN.POZ.	m/s ²	Peak	8.86	6.34	-28.41	2012-03-07 09:29
ŁOŻ.WEW.SLN.POZ.	m/s ²	RMS	6.27	4.49	-28.41	2012-03-07 09:29
ŁOŻ.WEW.SLN.PION.	mm/sec	RMS	1.1	1.67	79.26	2012-03-07 09:30
ŁOŻ.WEW.SLN.PION.	m/s ²	RMS	6.95	4.09	-41.17	2012-03-07 09:30
ŁOŻ.WEW.SLN.PION.	m/s ²	Peak	0.83	5.78	41.17	2012-03-07 09:30
ŁOŻ.WEW.SLN.OS.	mm/sec	RMS	1.44	1.73	20.83	2012-03-07 09:30

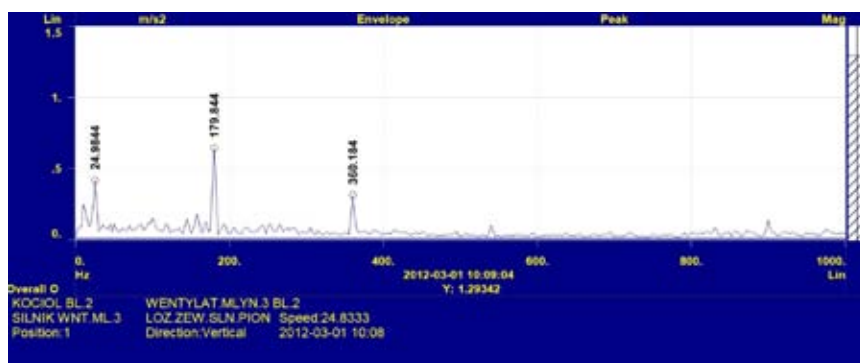
Rys. 6. Pomierzone wartości skuteczne prędkości drgań oraz szczytowe i skuteczne przyspieszenia drgań w celu wyznaczenia współczynnika szczytu przed wymianą i po wymianie łożyska silnika od strony przeciwnapędowej



Rys. 7. Widmo prędkości drgań dla kierunku pomiaru pionowego łożyska silnika od strony przeciwnapędowej przed wymianą łożyska



Rys. 8. Widmo prędkości drgań dla kierunku pomiaru pionowego łożyska silnika od strony przeciwnapędowej po wymianie łożyska



Rys. 9. Analiza obwiedni dla kierunku pomiaru pionowego łożyska silnika od strony przeciwnapędowej przed wymianą łożyska z określeniem wartości częstotliwości.

**Harumet et officabor apis ad elicto
magnissum restrum fugiae consec-
tur, suntur, cusdaepedis rempore
recture, optatur enditendite pelique**

wość sygnału charakterystycznego dla poszczególnych elementów łożyska.

Częstotliwości odpowiadające defektom elementów łożyska tocznego można obliczyć w oparciu o zależności:

► element toczny:

$$f_0 = \frac{1}{2} f_n D/d \{1 - (d/D \cos \beta)^2\}$$

► bieżnia wewnętrzna

$$f_w = \frac{1}{2} n f_n \{1 + d/D \cos \beta\}$$

► bieżnia zewnętrzna

$$f_z = \frac{1}{2} n f_n \{1 - d/D \cos \beta\}$$

► koszyk

$$f_k = \frac{1}{2} f_n \{1 - d/D \cos \beta\}$$

gdzie:

d – średnica elementu tocznego,

D – średnica podziałowa łożysk,

β – kąt pracy łożyska,

n – liczba elementów tocznych,

f_r – częstotliwość obrotowa między pierścieniem zewnętrznym a wewnętrznym.

Programy diagnostyczne oraz strony producentów łożysk posiadają bazy i kalkulatory, które po wprowadzeniu prędkości obrotowej oraz typu łożyska obliczają częstotliwości odpowiadające defektom elementów łożyska tocznego. Korzystając z takiego kalkulatora dla łożyska FAG NU222E i prędkości 1494 obr./min, obliczone częstotliwości wyniosły:

$$f_{1x \text{ obrotowa}} = 25 \text{ Hz}$$

$$f_{2x \text{ obrotowa}} = 50 \text{ Hz}$$

$$f_{3x \text{ obrotowa}} = 75 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{koszyka}} = 10,583 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{elementu tocznego}} = 79,565 \text{ Hz}$$

$$f_{2x \text{ elementu tocznego}} = 159,13 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{bieżni zewnętrznej}} = 179,91 \text{ Hz}$$

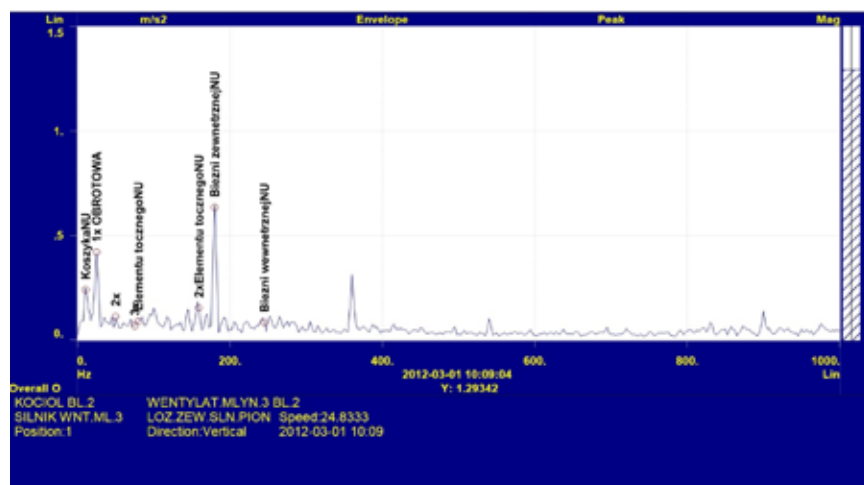
$$f_{2x \text{ bieżni zewnętrznej}} = 359,82 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{bieżni wewnętrznej}} = 245,1 \text{ Hz}$$

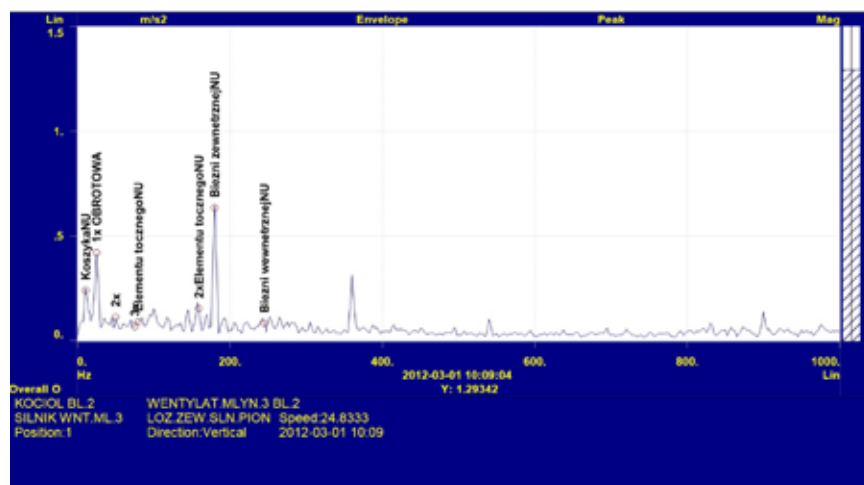
W widmach analizy obwiedni dla pomiarów łożyska silnika od strony przeciwnapędowej zarejestrowano występowanie częstotliwości generowanych przez ruch obrotowy elementów tocznych tego łożyska (rys. 9 i 10). Po wymianie łożyska te częstotliwości nie występowały (rys. 11).

Nasłuchiwanie łożyska

Niespokojny bieg łożyska można wykryć poprzez okresowe osłuchiwanie go przez obsługę ruchową maszyny. Znacznie efektywniejsze osłuchiwanie można prowadzić za pomocą stetoskopu elektronicznego. Poprawnie pracujące łożysko wywołuje miękkie, czysty szum. Nietypowe dźwięki o charakterze mielenia, gwizdania lub innym wskazują na ogół na pogorszenie stanu łożyska. Doświadczona obsługa posługująca się stetoskopem może je wykryć i zlokalizować. Po osłuchaniu stetoskopem badanego



Rys. 10. Analiza obwiedni dla kierunku pomiaru pionowego łożyska silnika od strony przeciwnapędowej przed wymianą łożyska z przypisaniem elementów łożyska



Rys. 11. Analiza obwiedni dla kierunku pomiaru pionowego łożyska silnika od strony przeciwnapędowej po wymianie łożyska



Rys. 12. Ślady uszkodzeń elementów tocznych



Rys. 13. Ślady uszkodzeń bieżni wewnętrznej

Rys. 14. Ślady uszkodzeń bieżni zewnętrznej

Harumet et officior apud elicto magnissimum restrum fugiae consecretur, suntur, cusdaepedis rempore recture, optatur enditendite

łożyska przed jego wymianą słychać było „terkot” oraz metaliczny dźwięk, co wskazywało na defekt łożyska.

Demontaż łożyska

Nie należy demontować łożyska bez ważnego powodu, a jeżeli już zostało ono zdemontowane, to należy się z nim obchodzić ze starannością. Poświęcenie czasu na przygotowanie do demontażu może znacznie uprościć zadanie i uchronić maszynę przed uszkodzeniem. Należy ustalić kolejność operacji ściągania i przygotować odpowiednie narzędzia, takie, które nie uszkodzą miejsc osadzenia łożyska. Przyrząd do demontażu należy zakładać na ten pierścień, który mamy zamiar ściągnąć.

Po demontażu łożysk badanego silnika poddano je oględzinom. Stwierdzono występowanie licznych uszkodzeń elementów łożyska silnika od strony przeciwnapędowej (rys. 12, 13 i 14).

Właściwa obsługa i sukcesywnie prowadzona diagnostyka eksploatacyjna łożysk tocznych gwarantują użytkownikowi ich długotrwałą i bezawaryjną pracę.

Mając dostęp do niezawodnej, szczegółowej i szybkiej informacji, obsługa zapobiegawcza maszyn może być znacznie skuteczniejsza, lepiej planowana i mniej kosztowna. Stosując nawet prosty i mało kosztowny nadzór drganiowy łożysk, można przedłużyć trwałość łożysk i zmniejszyć liczbę ich wymian. Uszkodzenie łożyska jest wykrywalne w bardzo wczesnym stadium i daje czas na zaplanowanie wymiany.

