

WIBROAKUSTYCZNE BADANIA WĘZŁÓW ŁOŻYSKOWYCH

Streszczenie

W pracy omówiono badanie stanu zużycia łożysk za pomocą sygnałów wibroakustycznych. Praca zawiera zarówno informacje dotyczące metodyki badań stanu łożysk za pomocą sygnałów wibroakustycznych, jak i przedstawia przykładowe badania łożyska za pomocą tych sygnałów.

1. WSTĘP

Łożyska są to elementy maszyn i urządzeń, których głównym zadaniem jest przenoszenie obciążeń roboczych z elementów wirujących na korpus przy małych oporach ruchu. Ze względu na kinematykę łożyska dzielimy na ślizgowe i toczne, natomiast ze względu na sposób przenoszenia obciążenia z wirnika na korpus łożyska dzielimy na poprzeczne (promieniowe), wzdłużne (oporowe) i poprzeczno-wzdłużne (skośne).

2. TYPOWE USZKODZENIA STANU ŁOŻYSK

Znaczna część uszkodzeń łożysk to uszkodzenia przedwczesne wynikające bezpośrednio z:

- nieprawidłowości powstałych w trakcie produkcji: tolerancja wykonania, niejednorodność materiału,
- nieprawidłowych czynności montażowych: złe montowanie i zamontowanie, tolerancja wymiarów, deformacja łożyska,
- błędnego magazynowania i transportu: nieostrożne pakowanie, wpływ drgań, konkretnego przypadku.

Statystykę uszkodzeń łożysk tocznych wg SKF [6] przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1.

Statystyka uszkodzeń łożysk tocznych wg SKF [6].

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

Istnieje wiele przyczyn powstawanie drgań w łożysku, najczęściej jednak przyczynami są:

- drgania własne łożyska lub jego elementów,
- luz promieniowy lub osiowy łożyska,
- brak wyważenia koszyka utrzymującego elementy toczne,
- błędy wykonania łożyska.

Poziom sygnałów wibroakustycznych wzrasta ze wzrostem zużycia łożyska.

Rozróżniamy trzy fazy jego uszkodzenia:

- faza szumowa,
- faza drganiowa,
- faza termiczna.

Faza szumowa

Obejmuje łożysko od chwili powstania pierwszych mikrouszkodzeń. Pojawiają się one początkowo w wysokich pasmach częstotliwości 30 – 60 kHz. Symptodem drganiowym w tych pasmach jest przyspieszenie drgań, a zastosowanie mają akcelerometry o największej częstotliwości rezonansowej. W pierwszej fazie są to pojedyncze impulsy drganiowe stopniowo jednak w miarę powiększania uszkodzeń sygnały te zamieniają się w szum szerokopasmowy poziomie do $4,0 \text{ m/s}^2$. W miarę powstawania mikrouszkodzeń pasmo drgań zawęża się w okolicy częstotliwości drgań elementów łożyska lub jego obudowy, najczęściej nieruchomej bieżni zewnętrznej ($4 \div 10 \text{ kHz}$). Na tle tego szumu pasmowego pojawiają się wysokie impulsy, tym częstsze im więcej mikrouszkodzeń powstaje na elementach łożyska. Pod koniec fazy szumowej szczytowe przyspieszenie drgań obudowy łożyska może sięgać 40 m/s^2 i powinno być sygnałem do planowej wymiany łożyska np. przy najbliższym postoju maszyny.

Faza drganiowa

W przypadku, gdy łożysko nie zostanie wymienione po etapie szumowym, następuje powolne powstawanie ubytków, wartość szczytowa przyspieszeń drgań znacząco wzrasta. Szczytowa wartość przyspieszenia drgań może wzrosnąć do 500 m/s^2 . Przy takiej wartości drgań żywotność łożyska może wynosić już tylko kilka godzin, następuje znaczne zwiększenie luzów w łożysku.

Faza termiczna

W przypadku, gdy dwa poprzednie etapy zostaną błędnie zdiagnozowane oraz zignorowane, dalsza praca łożyska powoduje jego znaczną deformację oraz spore ubytki masowe. Z tego powodu generowane jest o wiele większe niż podczas normalnej pracy tarcie, co wiąże się bezpośrednio ze znacznym wydzielaniem ciepła. Następuje wzrost oporów ruchu. Energia wydatkowana na pokonanie siły tarcia zostaje przeznaczona na ciepło, zmieniając jednocześnie własności wytrzymałościowe łożyska. Łożysko osiąga bardzo wysoką temperaturę, a następnie ulega awarii.

Z punktu widzenia diagnostyki łożysko powinno być wymienione pod koniec fazy szumowej przed jego wejściem w fazę drganiową, a w żadnym przypadku nie należy dopuścić do fazy termicznej.

W wyniku wieloletnich badań M.P. Blake i W.S. Mitchel [4] zaproponowali następujące kryteria drganiowe dla łożysk, które przedstawiono w tabelicy 2.

3. DIAGNOSTYKA DRGANIOWA ŁOŻYSK

Łożyska toczne należą do części maszyn niezwykle wrażliwych na drgania mechaniczne, dlatego też bardzo ważnym jest przeprowadzanie ich stałej kontroli dla zapewnienia ich poprawnej bezawaryjnej pracy. Do najczęściej stosowanych metod pomiarowych drgań łożysk stosuje się:

- pomiar ogólnego poziomu drgań węzłów łożyskowych,
- pomiar współczynników szczytu,
- analiza widmowa drgań,
- pomiar kurtozy,
- analiza obwiedni,
- metoda Shock Puls - SPM,
- pomiar hałasu.

3.1. Pomiar ogólnego poziomu drgań łożyskowych

Pomiar polega na pomiarze przyspieszenia oraz prędkości drgań łożyska w trzech kierunkach poziomym x, pionowym y oraz osiowym z. Wyniki pomiarów porównujemy ze stosownymi normami i przepisami. Najczęściej jest to norma ISO 10816 oraz zalecenia z tablicy 2.

Tablica 2.

Symptomy drganiowe stanów łożysk tocznych [4] 38 – 200 mm (1,5 cali – 8 cali średnicy zewnętrznej).

Klasyfikacja uszkodzenia Stan łożyska:	Wartość szczytowa przyspieszenia drgań obudowy \hat{a}		Prędkość drgań obudowy
	g	Impulsy \hat{g}	mm/s
AA – katastrofalny, (awaryjny, wyłącz)	100	200	140,5
A – napraw w ciągu 2 dni	17,8	35,0	59,25
B – do planowej wymiany w ciągu 21 dni	3,16	6,0	25,00
C – niewielki defekt	0,56	1,0	10,5
D – bez uszkodzeń	0,01-0,1	0,2	0,25-4,5
$g = 9,81 \text{ m/s}^2$		Impulsy – chwilowe impulsy ponad poziom średni obserwowane na oscyloskopie	

3.2. Pomiar współczynnika szczytu

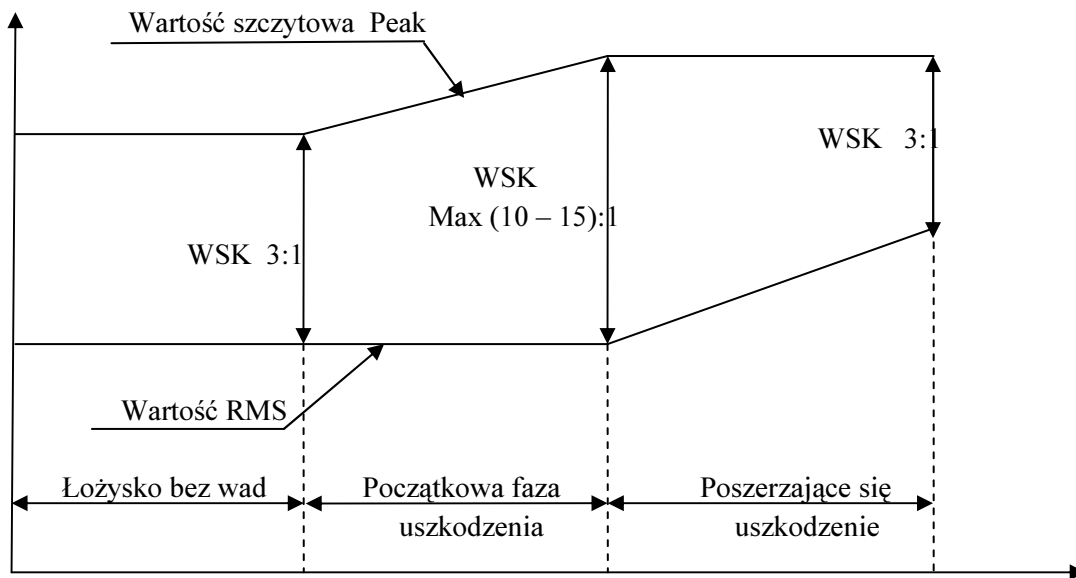
Współczynnik szczytu jest stosunkiem wartości szczytowej sygnału drganiowego do jego wartości skutecznej w danym przedziale częstotliwości drgań. Wartość współczynnika szczytu może być estymatą stanu łożyska tocznego. Najczęściej metoda ta opiera się na pomiarach przyspieszenia drgań. Przyjmuje się, że współczynnik szczytu WSK większy od 3 świadczy o symptomie uszkodzenia łożyska.

$$WSK = \frac{P_{Peak}}{P_{RMS}}$$

P_{Peak} – przyspieszenie szczytowe sygnału drganiowego [m/s^2],

P_{RMS} – przyspieszenie skuteczne sygnału drganiowego [m/s^2].

Przyspieszenie
drgań



Rys. 1. Wartość współczynnika szczytu dla łożyska tocznego w czasie jego eksploatacji.

Współczynnik szczytu jest szczególnie wrażliwy na występowanie uszkodzeń, którym towarzyszą impulsowe siły wymuszające, szczególnie jeśli wymuszenie impulsowe jest współkresowe z obrotami wału, na którym łożysko jest osadzone.

3.3. Analiza widmowa drgań

Oszacowanie zakresu drgań węzła łożyskowego najczęściej przeprowadza się, korzystając z szybkiej transformaty Fouriera FFT (Fast Fourier Transform). Wyraża się ona wzorem:

$$F(f) = \int_0^T f(t) \cdot W(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

gdzie:

$f(t)$ – wykres czasowy drgań,

$W(t)$ – okienko całkowania – najczęściej Hanninga.

Analizę tę przeprowadza się w wielu pasmach analizy, starając przyporządkować poszczególnym częstotliwościom drgań odpowiednie uszkodzenia maszyny oraz odseparować ich od częstotliwości drgań odpowiadających uszkodzeń łożyska.

3.4. Pomiar kurtozy

Kurtoza k jest miarą stanu technicznego wyznaczoną dla przebiegu czasowego.

$$k = \frac{E(x - u)^4}{\sigma^4}$$

E – estymator wartości oczekiwanej,

x – zmienna losowa,

u – wartość średnia,

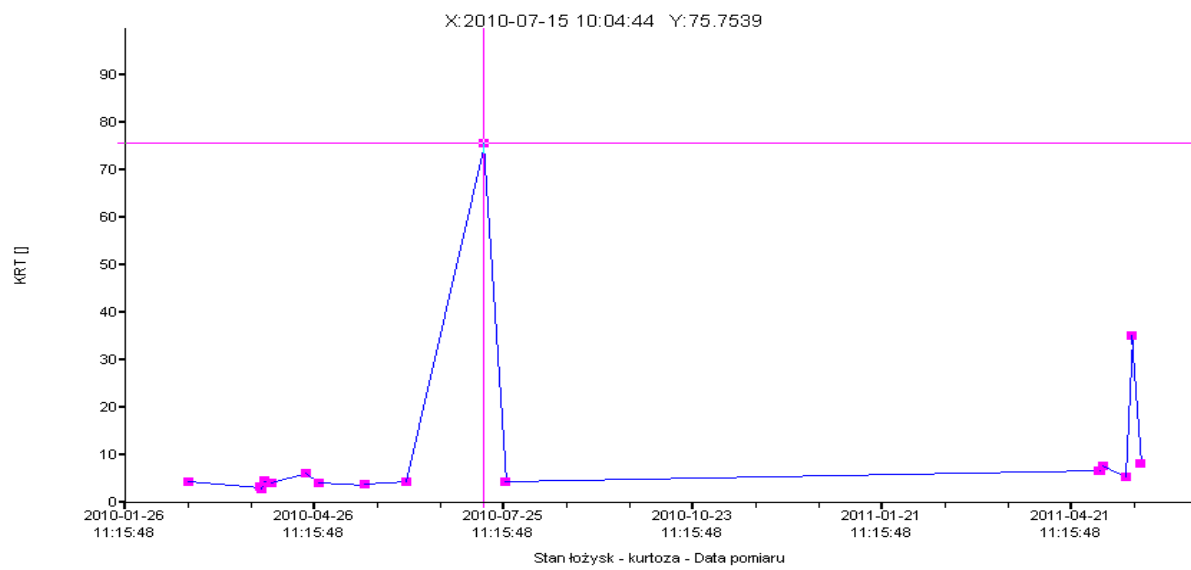
σ – odchylenie standardowe.

Dla rozkładu gausowskiego kurtoza wynosi 3. Jeżeli kurtoza przyjmuje wartość większą od 3, może to świadczyć o spłaszczeniu rozkładu, który może być spowodowany występowaniem impulsów w sygnale czasowym.

Wartość kurtozy łożysk kulkowych w paśmie 10 kHz – 20 kHz . Sprężarka GARO 22 "C". System monitorowania drgań firmy MBJ Electronics

Tablica 4. Wartości kurtozy KRT łożyska kulowego SKF, przeciwbieżnego typu 7320 BECEBM (oznaczone w układzie jako 3H).

Lp.	Data pomiaru [rr-mm-dd]	KRT
1	2010-02-25	4.4
2	2010-03-31	3.3
3	2010-04-01	3.0
4	2010-04-02	4.0
5	2010-04-02	4.6
6	2010-04-06	4.3
7	2010-04-22	6.2
8	2010-04-28	4.2
9	2010-05-20	4.1
10	2010-06-09	4.5
11	2010-07-15	75,75
12	2010-07-16	5.8
13	2010-07-26	4.4
14	2011-05-04	6.7
15	2011-05-05	6.7
16	2011-05-06	7.8
17	2011-05-17	5.6
18	2011-05-20	5.3
19	2011-05-24	8.3
20	2011-06-22	5.4

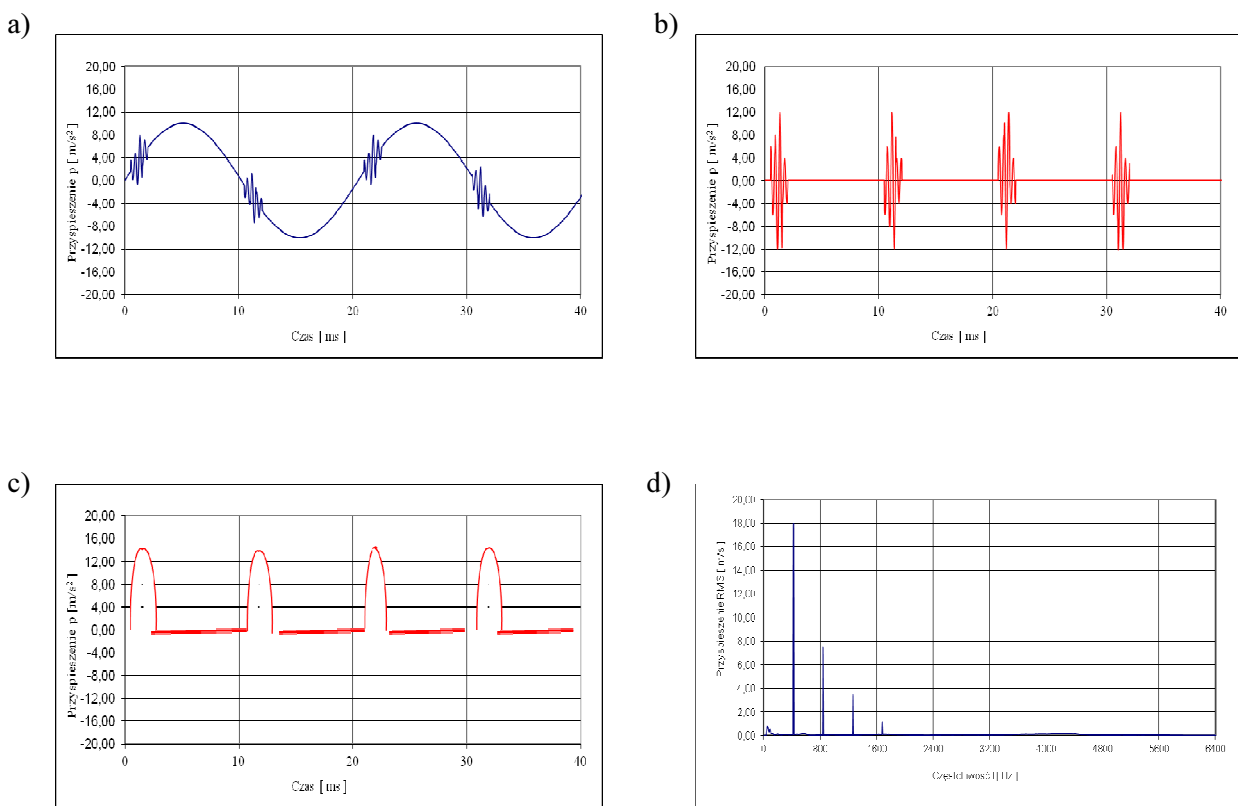


Rys. 2. Wartość zbiorcza kurtozy łożyska kulkowego (3H) sprężarki.

3.5. Analiza obwiedni

Analiza obwiedni sygnału polega na tym, że sygnał drganiowy po wstępnej filtracji rezonansu czujnika podlega demodulacji, a następnie wyznaczone jest widmo powstałej obwiedni sygnału. Tak wyznaczone widmo obwiedni sygnału drganiowego może zawierać składowe o częstotliwościach drgań odpowiadających defektom elementów łożyska.

Przykład pomiarów drgań uszkodzonego łożyska z zastosowaniem analizy obwiedni przedstawiono na rys. 3.

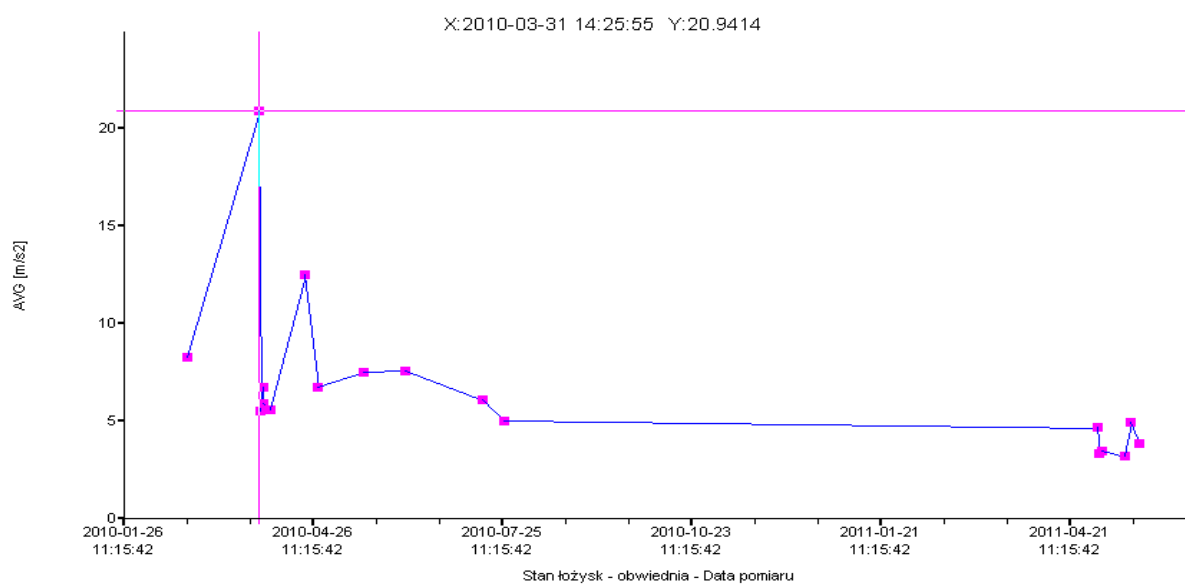


Rys. 3. Analiza obwiedni, (a) Przebieg czasowy sygnału drganiowego, (b) Przebieg czasowy po filtracji, (c) Obwiednia sygnału drganiowego po filtracji i wyprostowaniu, (d) Analiza widmowa obwiedni sygnału.

Wartość obwiedni w paśmie 500 Hz – 10 kHz . Sprężarka GARO 22 "C".
System monitorowania drgań firmy MBJ Electronics

Tablica 3. Wartości obwiedni drgań 500 Hz – 10,0 kHz AVG [m/s²] łożyska kulkowego SKF, przeciwbieżnego typu 7320 BECEBM (oznaczone w układzie jako 3H).

Lp.	Data pomiaru [rr-mm-dd]	AVG [m/s ²]	Peak [m/s ²]
1	2010-02-25	8.28	34.72
2	2010-03-31	20.94	92.98
3	2010-04-01	5.53	11.20
4	2010-04-02	6.73	28.59
5	2010-04-02	5.95	26.47
6	2010-04-06	5.59	26.04
7	2010-04-22	12.55	160.74
8	2010-04-28	6.78	28.64
9	2010-05-20	7.52	33.43
10	2010-06-09	7.60	37.13
11	2010-07-16	6.12	28.64
12	2010-07-26	5.04	20.78
13	2011-05-04	4.70	26.55
14	2011-05-05	3.38	20.34
15	2011-05-06	3.50	14.93
16	2011-05-17	3.23	17.95
17	2011-05-20	5.00	29.05
18	2011-05-24	3.88	16.98
19	2011-06-22	4.76	29.86



Rys. 4. Wartość zbiorcza obwiedni drgań dla łożyska kulkowego (3H) sprężarki.

3.6. Metoda Shock Puls SPM

Metodę SPM (ang. Shock Pulse Method) opatentowano pod koniec lat 60. Polega ona na detekcji i pomiarze impulsów udarowych w obszarze rezonansowym przetwornika drgań (32 Hz) [7], a następnie analizowanie fali udarowej wywołanej zderzeniem się dwóch elementów. Impulsy te są odpowiedzialne za utworzenie fali ciśnieniowej, która tworzy się na styku elementów tocznych z bieżnią. Metoda Shock Puls polega na odczycie, gromadzeniu, a następnie przetwarzaniu informacji o fali ciśnieniowej na sygnał impulsów elektrycznych najczęściej poprzez czujniki piezoelektryczne. W metodzie tej doświadczalnie ustalono skalę oceny jakości łożysk tocznych uwzględniającą wielkość łożyska oraz prędkość obrotową wału. Doświadczalnie również określono poziom prędkości uderzeń v_n (ze względu na związek prędkości z energią uderzenia) łożyska pracującego poprawnie jako:

$$V_n = \beta n d \gamma$$

gdzie:

n – prędkość obrotowa wału [min^{-1}],

d – średnica wewnętrzna łożyska [mm],

β, γ – współczynniki ustalone doświadczalnie.

Wartość SPM sygnału wyliczana jest z zależności:

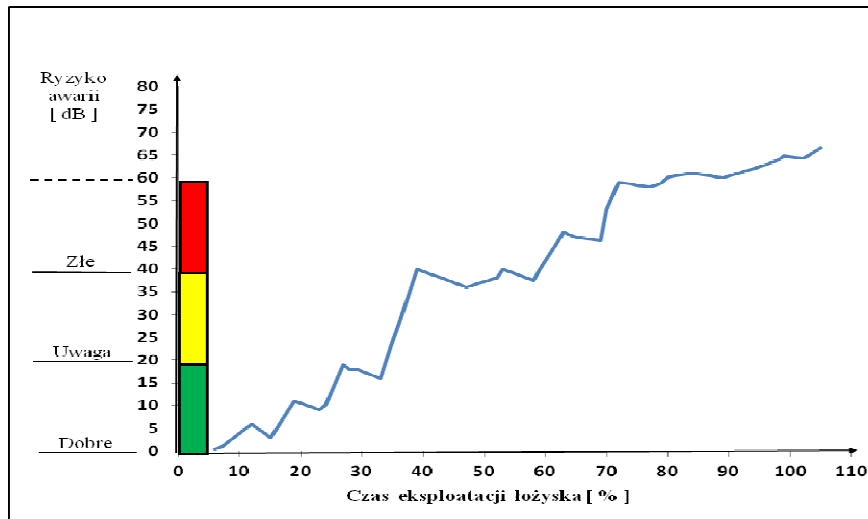
$$\text{SPM} = 20 \log (v_n/v_{n0}) [\text{dB}]$$

gdzie :

v_n – prędkość uderzenia łożyska uszkodzonego.

Ocena stanu łożyska polega na porównaniu aktualnie zmierzonego poziomu prędkości uderzeń z poziomem określonym dla łożyska pracującego poprawnie. Wyrażony w decybelach stosunek tych poziomów zawiera informację o stanie łożyska (rys. 5). Szczególnie ważne jest to, że odczyt pomiarów prowadzonych w obszarze drgań rezonansowych przetwornika jest silnie uzależniony od sposobu jego mocowania i lokalizacji.

Na rys. 5 przedstawiono rozwój uszkodzeń w łożysku obserwowany na podstawie pomiaru impulsów udarowych SPM.



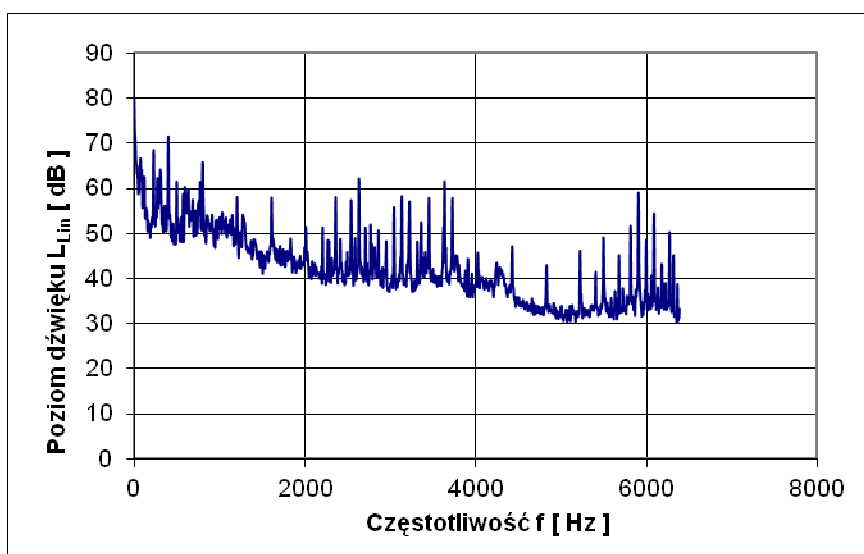
Rys. 5. Rozwój uszkodzeń w łożysku obserwowany na podstawie pomiarów impulsów uderowych SPM.

Należy pamiętać, że główną informacją w metodzie Shock Puls nie jest wartość drgań, lecz wartość fali ciśnieniowej. Gdy znane są rodzaje impulsów oraz odpowiadające im uszkodzenia, możliwe jest dokonanie diagnozy łożyska oraz wykrycie jego uszkodzenia. Przykładem są:

- Impulsy uderzeniowe o regularnych odstępach, które są najczęściej spowodowane znacznym uszkodzeniem łożyska w postaci popękanej bieżni,
- Impulsy uderzeniowe o nieregularnych odstępach, które są spowodowane powstaniem odcisków drobin na powierzchni łożyska,
- Impulsy uderzeniowe o niskim poziomie, które są zazwyczaj tworzone przez przypadkowe losowe uderzenia pomiędzy chropowatościami powierzchni.

3.7. Pomiar hałasu

Najczęstszym powodem głośniejszej pracy łożyska jest przedostanie się do wnętrza łożyska zanieczyszczeń, takich jak piasek, farba lub woda, jak również błędne dobranie środka smarnego lub nieprawidłowe jego dozowanie (zbyt mała lub nadmierna ilość), co powoduje zwiększenie jego głośności pracy. Również zbyt mały luz łożyska, odkształcenie jego oprawy lub ocieranie uszczelnienia są częstymi przyczynami hałasu łożyska. Pomiaru hałasu łożyska dokonuje się w polu bliskim w odległości mikrofonu ok. 10 cm od obudowy łożyska.



Rys. 6. Poziom dźwięku łożyska kulkowego z symptomem uszkodzenia jego bieżni zewnętrznej.

3.8. Drgania udarowe w łożyskach

W literaturze firmy Brüel & Kjaer [3] stosowane są następujące wzory na drgania udarowe łożysk, które przedstawione w tabelicy 1.

W tabelicy tej przedstawiono częstotliwości drgań będących symptomami:

- Uszkodzenie pierścienia zewnętrznego łożyska,
- Uszkodzenie pierścienia wewnętrznego łożyska,
- Uszkodzenia elementów tocznych.

Częstotliwości drgań elementów łożysk tocznych są wyliczane według następujących wzorów [2]:

- uszkodzenie koszyka łożyska, FDF (*Fundamental Train Frequency*):

$$f_{FDF} = \frac{1}{2} \cdot f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right) \text{ [Hz]}$$

- uszkodzenie pierścienia zewnętrznego łożyska, BPFO (*Ball Pass Frequency Outer*):

$$f_{BPFO} = \frac{n}{2} \cdot f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right) \text{ [Hz]}$$

- uszkodzenie pierścienia wewnętrznego łożyska, BPFI (*Ball Pass Frequency Inner*):

$$f_{BPFI} = \frac{n}{2} \cdot f_r \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right) \text{ [Hz]}$$

- uszkodzenie elementu tocznego łożyska, BDF (*Ball Defect Frequency*):

$$f_{BDF} = \frac{PD}{BD} \cdot f_r \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta \right)^2 \right) \text{ [Hz]}$$

gdzie **BD** - średnicą części tocznej, **PD** - średnica podziałowa łożyska, β - kąt działania łożyska, **n** - liczba części tocznych w łożysku, f_r - względną częstotliwością obydwu bieżni.

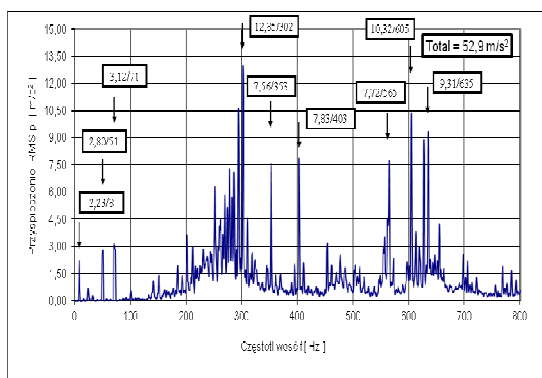
4. PRZYKŁADY BADAŃ DRGAŃ ŁOŻYSK

4.1. Drgania łożyska wału oczyszczarki lotniskowej

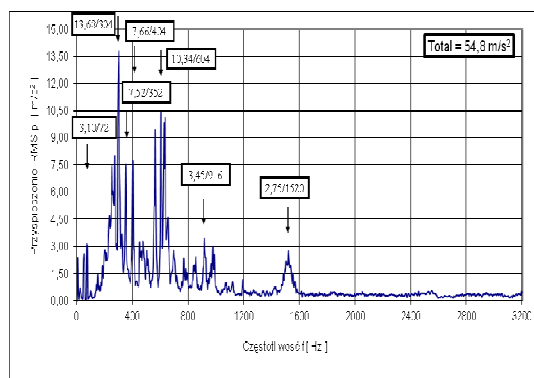
Wał oczyszczarki lotniskowej obracał się z prędkością obrotową 480 obr./min, co odpowiadało częstotliwości 8 Hz. Z obu stron wału zastosowane były łożyska dwurzędowe wahliwe typu 1311. Posiada ono 2x15 kulek, średnicę podziałową PD = 90 mm, średnicę kulki BD = 14 mm. Zgodnie ze wzorami przedstawionymi w punkcie 3.6 otrzymujemy.

$$f_{BPFO} = 50,7 \text{ Hz}; f_{BPFI} = 69,3 \text{ Hz}; f_{BDF} = 50,2 \text{ Hz};$$

a)



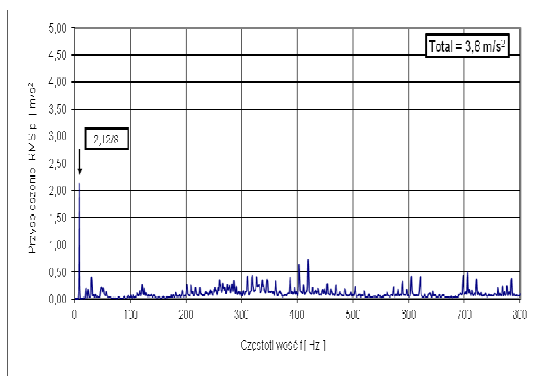
b)



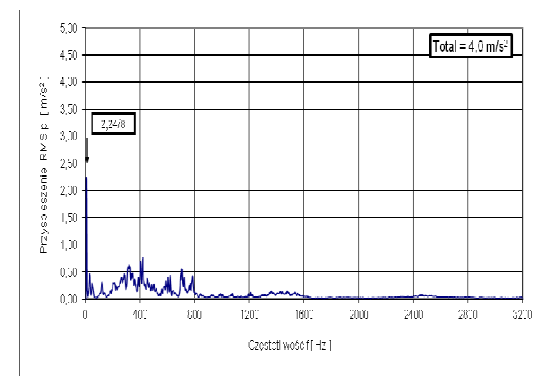
Rys. 7. Widmo przyspieszenia drgań poziomych uszkodzonego łożyska oczyszczarki lotniskowej.

a) Pasma analizy 800 Hz, b) Pasma analizy 3200 Hz.

a)



b)



Rys. 8. Widmo przyspieszenia drgań poziomych nowego łożyska oczyszczarki lotniskowej.

a) Pasma analizy 800 Hz, b) Pasma analizy 3200 Hz.

Wartość szczytowa przyspieszenia drgań poziomych:

- łożyska uszkodzonego: $p_{Peak} = 396 \text{ m/s}^2$

- łożyska nowego: $p_{Peak} = 9,4 \text{ m/s}^2$

Średnia wartość skuteczna RMS przyspieszenia drgań poziomych:

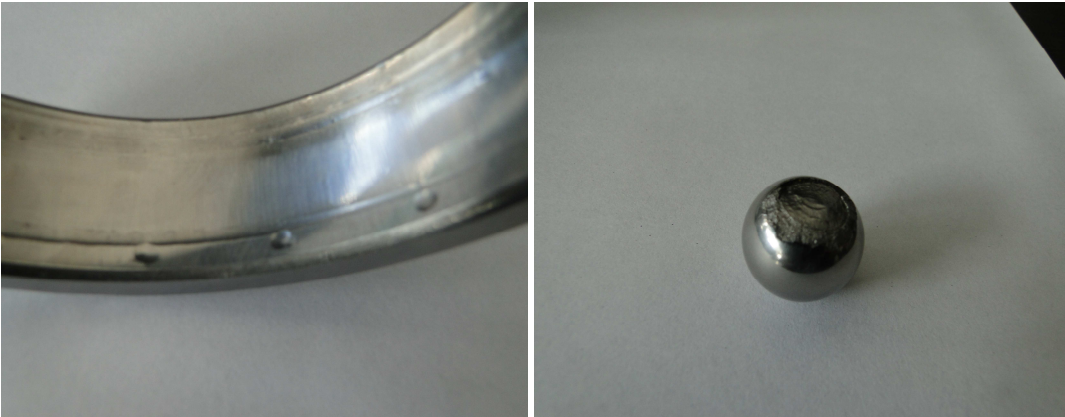
- łożyska uszkodzonego: $p_{RMS} = 54,8 \text{ m/s}^2$

- łożyska nowego: $p_{RMS} = 4,0 \text{ m/s}^2$

Wyliczony współczynnik szczytu WSK:

- łożyska uszkodzonego: $WSK = 7,2:1$

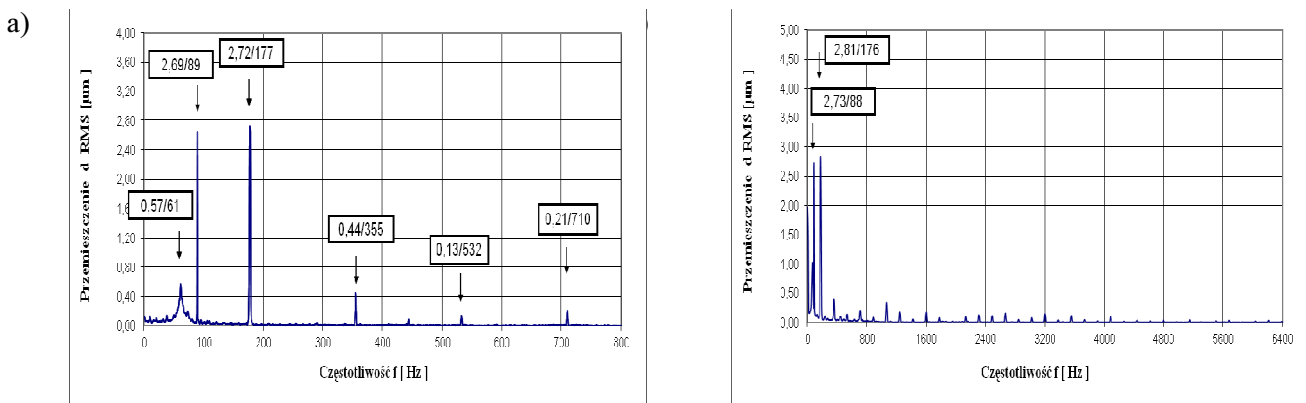
- łożyska nowego: $WSK = 2,3:1$ a) b)



Rys. 9. Widok uszkodzonego łożyska. a) Bieżnia zewnętrzna, b) Kulka

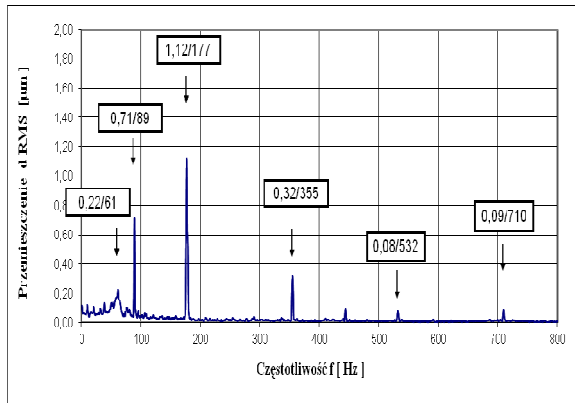
4.2. Drgania łożyska ślizgowego sprężarki

Poniżej przedstawiono drgania względne sprężarki niskoprężnej pracującej z prędkością obrotową 10 620 obr./min. Pomiary drgań wykazały powstawaniem drgań samowzbudnych, subharmonicznych o częstotliwości $\frac{1}{2}$ częstotliwości obrotowej równej 89 Hz spowodowanych nadmiernym luzem łożyskowym oraz drgań o częstotliwości składowej obrotowej spowodowanych zarówno niewyważeniem wirnika, jak i jego rozosiowaniem z turbiną. Przedstawiono je na rys. 10. Po usunięciu tych nieprawidłowości drgania względne zmniejszono kilkakrotnie. Przedstawiono je na rys. 11.

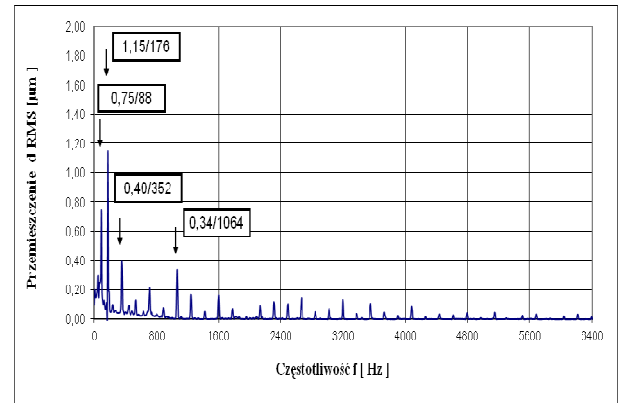


Rys. 10. Widmo przemieszczenia drgań względnych wału sprężarki z podwyższonymi luzami łożyskowymi. a) Pasma analizy 800 Hz, b) Pasma analizy 6400 Hz.

a)



b)



Rys. 11. Widmo przeszycczenia drgan wzglednych walu sprzeczarki po likwidacji luzow lozyskowych oraz rozosiowania i niewyważenia. a) Pasma analizy 800 Hz, b) Pasma analizy 6400 Hz.

Literatura:

- [1] Brüel & Kjaer: Peak and Envelope Analysis for Bearing Fault Detection. Application notws BO 0286-11.
- [2] Brüel & Kjaer: Machine Condition Monitoring using Vibration Analysis. Application notws BO 0247-11.
- [3] Brüel & Kjaer: Wibracje i wstrząsy. Karta diagnostyczna.
- [4] Bloke M.P. and Mitchel W.S., 1972. Vibration and acoustic measurement handbook, New York, Spartan Books, Chapter 22.
- [5] Szymaniec S. Analiza drgan węzłów lozyskowych silników elektrycznych. Napędy i sterowanie Nr 10 2009 r.
- [6] SKF. Katalog. 2004.
- [7] Cempel Cz., Tomaszewski F., Diagnostyka maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań. MCNEMT, Radom 1992.
- [8] Dwojak J., Rzepiela M., Diagnostyka drganiowa stanu maszyn i urządzeń. Przewodnik praktyczny. Biuro Gamma. Warszawa 1999.