ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: TRANSPORT z. 46 Nr kol. 1571

Bogusław ŁAZARZ, Grzegorz WOJNAR, Tomasz FIGLUS

WYKRYWANIE USZKODZEŃ ŁOŻYSK W PRZEKŁADNI ZĘBATEJ

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych poprzez laserowy pomiar prędkości drgań wałów przekładni zębatej. Analizom poddawano zmierzone na stanowisku laboratoryjnym sygnały prędkości drgań wałów i obudowy łożyska oraz sygnał przyspieszeń drgań obudowy łożyska. Do pomiarów wykorzystano wibrometr laserowy oraz piezoelektryczny przetwornik przyspieszeń drgań. Badano łożyska nowe oraz z uszkodzonymi bieżniami przy różnych obciążeniach i prędkościach obrotowych.

THE DIAGNOSTICS OF BEARING DAMAGE OF GEAR IN POWER TRANSMISSION SYSTEM

Summary. The paper presents the application of time-frequency analysis (pseudo - Wigner-Ville Transform) in diagnostics of bearing local damages in toothed gears. Two types local faults of bearing were examined (faults of outer race and inner race). The aim of the laboratory examinations was to verify the applicability of the method. Gear vibrations have been recorded in the selected points of gearbox and shaft gear at a given speed and gear load. Laser vibrometer was used for diagnostics of bearing damage.

1. WSTĘP

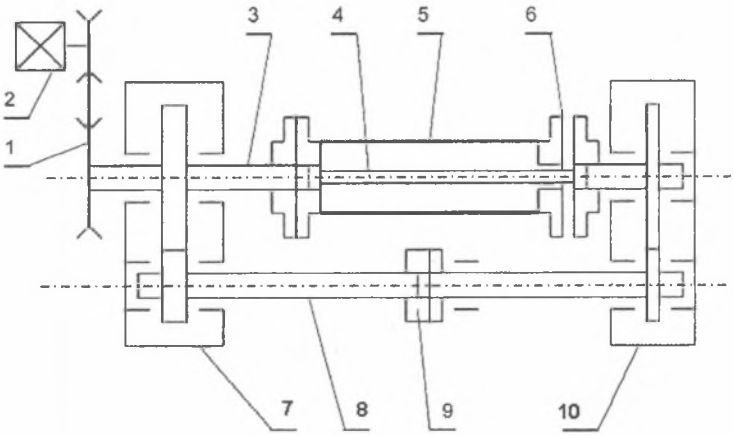
Stan techniczny łożysk tocznych w istotny sposób wpływa na niezawodność i ekonomiczność eksploatacji maszyn i urządzeń z elementami wirującymi. Łożyska toczne charakteryzują się dużą niezawodnością, jeśli są spełnione wszystkie wymagania konstrukcyjne, montażowe i eksploatacyjne. Niedotrzymanie tych wymagań powoduje, że rośnie prawdopodobieństwo awarii łożyska, która może doprowadzić do uszkodzeń innych elementów maszyny.

Ruch elementów tocznych w koszyku łożyska oraz na powierzchniach bieżni zewnętrznej i wewnętrznej wywołuje okresowo zmienne siły ściskające, które powodują deformacje i w konsekwencji drgania mechaniczne. Wystąpienie uszkodzeń na powierzchniach bieżni i elementów tocznych może spowodować wzmocnienie drgań, czyniąc je użytecznymi diagnostycznie. Wykrywanie uszkodzeń łożysk w przypadku przekładni zębatych jest utrudnione, ponieważ na sygnał drganiowy generowany w łożysku nakłada się sygnał drganiowy pochodzący od zazębienia.

Trudnym i złożonym problemem diagnostycznym jest wykrywanie uszkodzeń kół zębatych w obecności uszkodzonych łożysk tocznych [1,2]. Pierwszym krokiem na drodze do rozwiązania tego problemu wykonanym w ramach tej pracy jest diagnozowanie wybranego uszkodzenia łożyska w przekładni zębatej.

2. STANOWISKO BADAWCZE

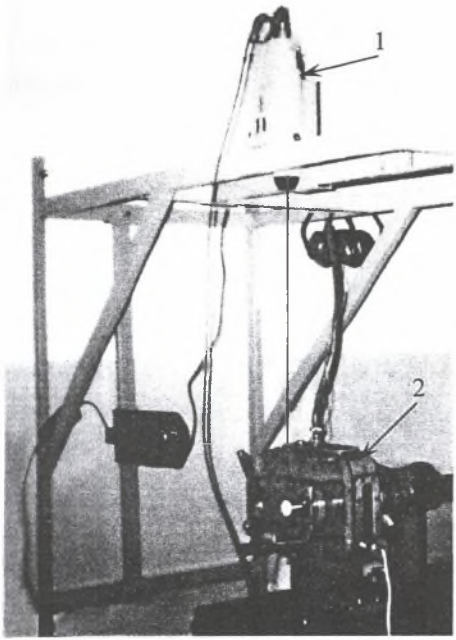
Do badań wykorzystano stanowisko pracujące w układzie mocy krążącej przedstawione na rys. 1. Stanowisko to pozwala na pracę badanych kół przy różnych prędkościach obrotowych oraz obciążeniu regulowanym za pomocą wałków skrętnych, sprzęgła napinającego i dźwigni z obciążnikami. W skład stanowiska wchodzą dwie przekładnie: zamykająca i badana, o jednakowym przełożeniu i rozstawie osi. Przekładnia zamykająca napędzana jest silnikiem elektrycznym o mocy 15 [kW] za pośrednictwem przekładni pasowej. Badano łożyska nowe oraz z uszkodzonymi bieżniami (zewnętrzna – pokazana na rys. 3 i wewnętrzną) przy różnych obciążeniach i prędkościach obrotowych. Wały przekładni badanej podparte były na łożyskach kulkowych zwykłych 6307. Uszkodzone łożyska montowano w przekładni badanej na wale zębnika i na wale koła.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego FZG: 1 – przekładnia pasowa, 2 – silnik, 3 – wałek, 4 – wałek skrętny, 5 – osłona wałka skrętnego, 6 – sprzęgło pomiarowe momentu obrotowego, 7 – przekładnia zamykająca, 8 – wałek sprzęgający, 9 – sprzęgło napinające, 10 – przekładnia badana

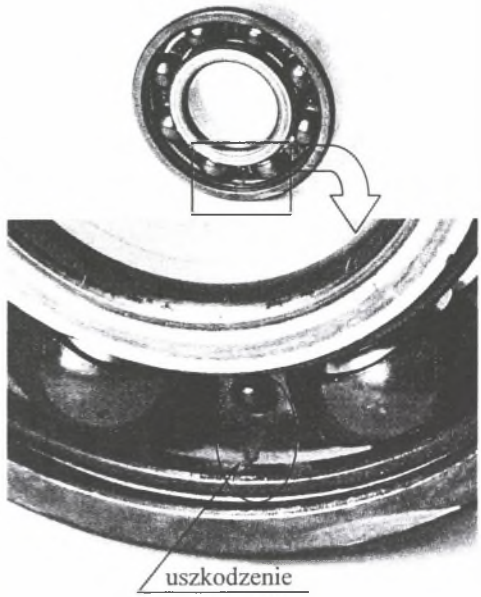
Fig. 1. FZG testing stand: 1 – belt transmission, 2 – electric motor, 3 – shaft, 4 – torsion shaft, 5 – shield of shaft, 6 – clutch, 7 – closing transmission with high strength gears, 8 – shaft, 9 – tightening clutch, 10 –tested transmission system

Do pomiarów wykorzystano wibrometr laserowy oraz piezoelektryczny przetwornik przyspieszeń drgań. Wibrometrem laserowym dokonywano pomiaru drgań wirujących wałów i obudowy łożyska. Przetwornikiem przyspieszeń drgań mierzono tylko drgania obudowy łożyska. W celu znalezienia najlepszego punktu pomiarowego (punktu, w którym najłatwiej wykryć uszkodzenie łożyska) wibrometrem laserowym wykonywano pomiary w kierunku działania siły międzyzębnej oraz poziomo i pionowo (rys. 4). Przeprowadzone analizy pokazały, że uszkodzenia bieżni najłatwiej wykryć dokonując pomiaru prędkości drgań wału w kierunku działania siły międzyzębnej.



Rys. 2. Pomiar prędkości drgań w kierunku pionowym: 1 – wibrometr laserowy, 2 – przekładnia badana

Fig. 2. Measurement of vertical vibration velocity: 1 – laser vibrometer, 2 – tested transmission system



Rys. 3. Uszkodzenie bieżni zewnętrznej łożyska tocznego

Fig. 3. Damage of outer ball race

3. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

W ostatnich latach rozwijane są metody diagnostyki wykorzystujące analizę sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości (rozkład Wignera-Ville'a – WV) lub czasu i skali proporcjonalnej do częstotliwości (ciągła transformata falkowa – CWT) [3] oraz metody oparte na sztucznej inteligencji. Do analizy wyników pomiarów w niniejszej pracy wykorzystano transformatę Wignera-Ville'a wyznaczaną zgodnie z zależnością:

$$WD(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) w(\tau) e^{-j2\pi f t}\, dt\,, \tag{1}$$

gdzie:

$x^*(t)$ – sygnał urojony sprzężony z $x(t)$,

$w(t)$ – funkcja wagi podobna do okna czasowego stosowanego w krótkoczasowej transformacie Fouriera (*STFT*).

Uszkodzenia bieżni łożyska powodują między innymi pojawienie się w widmie drgań częstotliwości charakterystycznych, które można wyznaczyć z zależności [3,4,5]:

- uszkodzenie bieżni zewnętrznej

$$f_{ord} = \frac{z}{2} * \frac{n}{60} * \left(1 - \frac{D_w}{d_m} * cos(\alpha)\right), \tag{2}$$

- uszkodzenie bieżni wewnętrznej

$$f_{ird} = \frac{z}{2} * \frac{n}{60} * \left(1 + \frac{D_w}{d_m} * cos(\alpha)\right), \tag{3}$$

gdzie:

z – liczba elementów tocznych,
n – względna prędkość obrotowa między bieżnią wewnętrzną a zew. [obr/min],
D_w – średnica elementów tocznych [mm],
d_m – średnica podziałowa [mm],
α – kąt styku (działania łożyska) [°].

Łożysko 6307 posiada następujące parametry:

D_w – 14,25 [mm],
d_w – 57,25 [mm],
α – 0 [°],
z – 8.

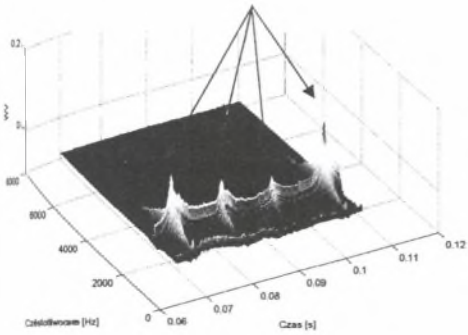
Częstotliwości i czasy charakterystyczne dla badanej przekładni zębatej i uszkodzeń pierścieni łożyska zamontowanego na wale koła przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Częstotliwości i okresy charakterystyczne dla badanej przekładni zębatej i łożyska wału koła z uszkodzonym pierścieniem zewnętrznym

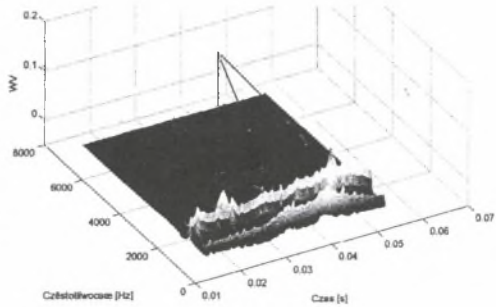
Częstotliwość obrotu koła [Hz]	f_{o2}	**15**	**30**
Częstotliwość powtarzania zazębiania [Hz]	$f_{pow.}$	7,5	15
Częstotliwość obrotu zębnika [Hz]	f_{o1}	22,5	45
Wyznaczona z zależności 2 częstotliwość wchodzenia w kontakt uszkodzonego fragmentu bieżni zewnętrznej z elementem tocznym [Hz]	f_{ord}	45,07	90,13
Wyznaczona z zależności 3 częstotliwość wchodzenia w kontakt uszkodzonego fragmentu bieżni wewnętrznej z elementem tocznym [Hz]	f_{ird}	74,94	149,87
Częstotliwość zazębiania [Hz]	f_z	360	720
Okres powtarzania zazębiania [s]	$t_{pow.}$	0.133333	0.066667
Okres obrotu koła [s]	t_{o2}	0.066667	0.033333
Okres obrotu zębnika [s]	t_{o1}	0.044444	0.022222
Wyliczony okres wchodzenia w kontakt uszkodzonego fragmentu bieżni zewnętrznej z elementem tocznym [s]	t_{ord}	0.022190	0.011095
Wyliczony okres wchodzenia w kontakt uszkodzonego fragmentu bieżni wewnętrznej z elementem tocznym [s]	t_{ird}	0,013344	0,006672
Okres zazębiania [s]	t_z	0.002778	0.001389

Na rys. 4-6 przedstawiono czasowo-częstotliwościowy rozkład Wignera-Ville'a prędkości drgań wału zmierzonej w różnych kierunkach. Najłatwiej wykryć uszkodzenie, dokonując pomiaru drgań wału w kierunku działania siły międzyzębnej (rys. 4). W przypadku pomiarów drgań obudowy łożyska (nawet dokonywanych w punktach leżących blisko uszkodzonego łożyska) trudno jest wykryć uszkodzenie bieżni (rys. 7).



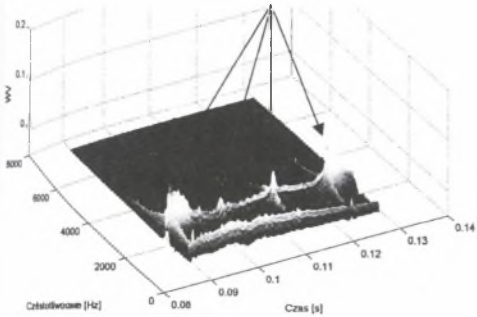
Rys. 4. Czasowo-częstotliwościowy rozkład Wignera-Ville'a prędkości drgań wału koła: $Q \approx 2$ [MPa], $f_{o2} = 30$ [Hz], pomiar w kierunku działania siły międzyzębnej (uszkodzona bieżnia zewnętrzna)

Fig. 4. Time-frequency distribution of shaft gear vibration velocity: $Q \approx 2$ [MPa], $f_{o2} = 30$ [Hz], measurement in direction of line of action (damage of outer ball race)



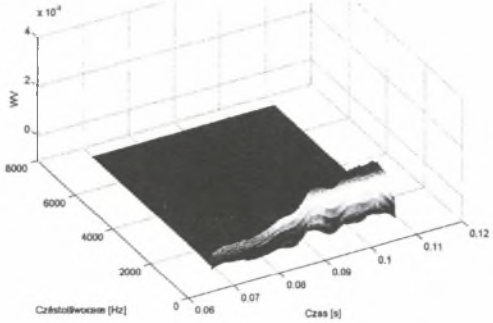
Rys. 5. Czasowo-częstotliwościowy rozkład Wignera-Ville'a prędkości drgań wału koła: $Q \approx 2$ [MPa], $f_{o2} = 30$ [Hz], pomiar w kierunku poziomym (uszkodzona bieżnia zewnętrzna)

Fig. 5. Time-frequency distribution of shaft gear vibration velocity: $Q \approx 2$ [MPa], $f_{o2} = 30$ [Hz], measurement in horizontal direction (damage of outer ball race)



Rys. 6. Czasowo-częstotliwościowy rozkład Wignera-Ville'a prędkości drgań wału koła: $Q \approx 2$ [MPa], $f_{o2} = 30$ [Hz], pomiar w kierunku pionowym (uszkodzona bieżnia zewnętrzna)

Fig. 6. Time-frequency distribution of shaft gear vibration velocity: $Q \approx 2$ [MPa], $f_{o2} = 30$ [Hz], measurement in vertical direction (damage of outer ball race)



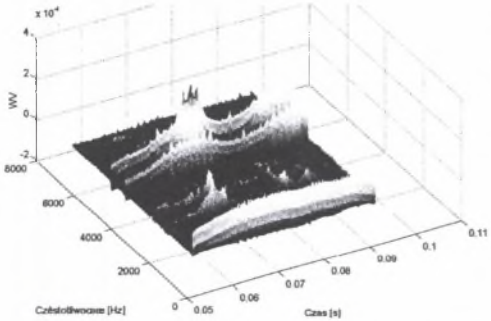
Rys. 7. Czasowo-częstotliwościowy rozkład Wignera-Ville'a prędkości drgań obudowy (blisko) łożyska koła: $Q \approx 2$ [MPa], $f_{o2} = 30$ [Hz], pomiar w kierunku działania siły międzyzębnej (uszkodzona bieżnia zewnętrzna)

Fig. 7. Time-frequency distribution of housing gear bearing vibration velocity (a short distance from bearing): $Q \approx 2$ [MPa], $f_{o2} = 30$ [Hz], measurement in direction of line of action (damage of outer ball race)

Na rys. 8 pokazano czasowo-częstotliwościowy rozkład Wignera-Ville'a przyspieszeń drgań obudowy łożyska koła. Wykrycie uszkodzenia bieżni zewnętrznej w tym przypadku nie jest możliwe, ponieważ czas pomiędzy lokalnymi wartościami maksymalnymi jest inny niż w przypadku występowania uszkodzenia bieżni zewnętrznej. Wykrycie uszkodzenia łożyska na podstawie rozkładu Wignera-Ville'a prędkości drgań w tym punkcie również okazało się niemożliwe.

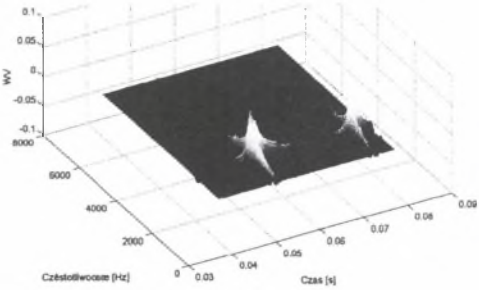
Użyteczność diagnostyczna pomiarów drgań wałów dokonywanych w kierunku działania siły potwierdzono również w przypadku innych prędkości obrotowych (rys. 9) i innych wartości obciążeń. Również uszkodzenie bieżni wewnętrznej najłatwiej jest wykryć mierząc drgania wałów w kierunku działania siły międzyzębnej (rys. 10). W tabeli 1 pokazano czas, jaki upływa między przetoczeniem się kolejnych elementów tocznych przez uszkodzony fragment bieżni. W przypadku uszkodzeń bieżni wewnętrznej okazało się jednak, że uszkodzenie najlepiej wykryć, gdy oś wału i element toczny przetaczający się po uszkodzonym fragmencie bieżni leżą na prostej pokrywającej się z kierunkiem pomiaru (wtedy duże lokalne maksimum w rozkładzie WV występuje raz na obrót wału). Nie zawsze oś wału i element toczny przetaczający się po uszkodzonym fragmencie bieżni leżą na prostej pokrywającej się z kierunkiem pomiaru. Wtedy w rozkładzie WV uzyskujemy obraz zaznaczony kółkiem - rys. 10. Czas upływający pomiędzy dwoma zaznaczonymi lokalnymi maksimami równy jest wyliczonemu okresowi wchodzenia w kontakt uszkodzonego fragmentu bieżni wewnętrznej z elementem tocznym.

Tak więc w przypadku bezkontaktowego pomiaru prędkości drgań wałów (rys. 4,5,6,9,10,) analiza Wignera-Ville'a pozwala na jednoznaczne wykrycie uszkodzenia.



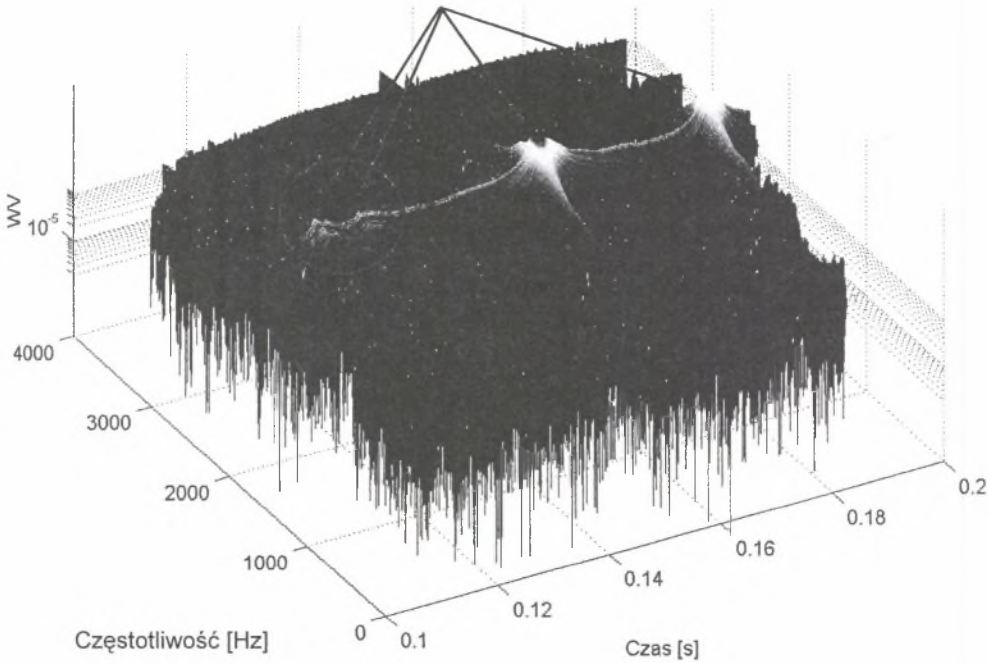
Rys. 8. Czasowo-częstotliwościowy rozkład Wignera-Ville'a przyśpieszeń drgań obudowy (daleko do) łożyska koła: $Q \approx 2$ [MPa], $f_{o2} = 30$[Hz], pomiar w kierunku pionowym (uszkodzona bieżnia zewnętrzna)

Fig. 8. Time-frequency distribution of housing gear bearing vibration acceleration (a long distance from bearing): $Q \approx 2$ [MPa], $f_{o2} = 30$ [Hz], measurement in vertical direction (damage of outer ball race)



Rys. 9. Czasowo-częstotliwościowy rozkład Wignera-Ville'a prędkości drgań wału koła: $Q \approx 2$ [MPa], $f_{o2} = 15$ [Hz], pomiar w kierunku działania siły międzyzębnej (uszkodzona bieżnia zewnętrzna)

Fig. 9. Time-frequency distribution of shaft gear vibration velocity: $Q \approx 2$ [MPa], $f_{o2} = 15$ [Hz], measurement in direction of line of action (damage of outer ball race)



Rys. 10. Czasowo-częstotliwościowy rozkład Wignera-Ville'a prędkości drgań wału koła: $Q \approx 4$ [MPa], $f_{o2} = 30$ [Hz], pomiar w kierunku działania siły międzyzębnej (uszkodzona bieżnia wewnętrzna)

Fig. 10. Time-frequency distribution of shaft gear vibration velocity: $Q \approx 4$ [MPa], $f_{o2} = 30$ [Hz], measurement in direction of line of action (damage of inner ball race)

4. WNIOSKI

Wykrycie uszkodzenia bieżni łożyska poprzez pomiar przyśpieszeń drgań na obudowie jest trudne ze względu na zakłócenia i tłumienie drgań na drodze od źródła do punktu pomiaru.

Wykrycie uszkodzenia bieżni poprzez pomiar prędkości drgań w tym samym punkcie również nie było możliwe.

Stosunkowo łatwo można wykryć uszkodzenie bieżni łożyska w przypadku pomiarów prędkości drgań wałów przy zastosowaniu analizy WV.

Pomiarów prędkości drgań wałów można dokonywać w każdym z kierunków, jednakże najlepsze efekty uzyskuje się mierząc drgania w kierunku działania siły międzyzębnej. Wtedy maksima wywołane przez uszkodzenie są najwyraźniejsze.

Literatura

1. Randall R.B.: Editorial for special edition on gear and bearing diagnostics. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001.
2. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Diagnozowanie wczesnych stadiów rozwoju uszkodzeń kół zębatych. Diagnostyka, vol. 24, 2001, s. 46-53.
3. Batko W., Mikulski A.: Zastosowanie metod falkowych w systemach monitoringu wibroakustycznego łożyskowania urządzenia wyciągowego. Diagnostyka vol. 26, 2002, s. 7-12.
4. Cempel C.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN, Warszawa 1989.
5. SKF Poradnik obsługi technicznej łożysk. Copyright SKF, 1994.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Wojciech Batko

Abstract

The paper presents the application of time-frequency analysis (pseudo - Wigner-Ville Transform) in diagnostics of bearing local damages in toothed gears. Two types local faults of bearing were examined (faults of outer race and inner race). The aim of the laboratory examinations was to verify the applicability of the method. Gear vibrations have been recorded in the selected points of gearbox and shaft gear at a given speed and gear load. Laser vibrometer was used for diagnostics of bearing damage. The results presented in the paper pinpoint the high sensitivity of WV time-frequency analysis upon unsteadiness of a vibration signal, which is induced by early stages of bearing damages.

Część wyników badań otrzymano podczas realizacji Grantu 8T07C04220