Tomasz FIGLUS, Grzegorz WOJNAR

ZASTOSOWANIE METOD WIBROAKUSTYCZNYCH DO WYKRYWANIA WYKRUSZENIA ZĘBA W OBECNOŚCI USZKODZEŃ ŁOŻYSK TOCZNYCH PRZEKŁADNI

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę diagnozowania sygnału wibroakustycznego emitowanego przez przekładnię zębatą, w której podczas eksperymentu czynnego symulowano lokalne uszkodzenie koła zębatego w obecności uszkodzeń łożysk tocznych.

W badaniach wykorzystano technikę laserowego pomiaru prędkości drgań wału przekładni. Otrzymany sygnał drganiowy analizowano z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera, filtracji grzebieniowej, odwrotnej transformaty Fouriera oraz analizy Wignera-Ville'a.

IMPLEMENTATION OF VIBRO-ACOUSTIC METHODS IN ORDER TO DETECT DROPPING OFF A TOOTH IN PRESENCE OF DAMAGES OF ROLLING BEARINGS

Summary. The following paper presents a method of detecting the vibro-acoustic signal emitted by a tooth gear, in which during the active experiment a local damage of tooth gear in the presence of rolling bearing damages were simulated.

The experiments took advantage of technique of laser measurement of vibration of transmission gear shaft. The received vibration signal was analysed by means of the fast Fourier's transform, comb filtration, inverse Fourier's transform as well as Wigner-Ville's analysis.

1. WSTĘP

Podczas pracy przekładni zębatej generowane są drgania, które analizuje się podczas diagnozowania jej stanu. Wykorzystanie tego sygnału, dzięki postępującej technice komputerowej, przyczyniło się do rozwinięcia technik wykrywania uszkodzeń przekładni zębatych. Przedstawione w wielu pracach badania [1-5] obejmowały osobną identyfikację lokalnych uszkodzeń kół zębatych oraz podstawowych uszkodzeń łożysk tocznych, nie dotyczyły przypadków złożonych uszkodzeń przekładni. Z punktu widzenia eksploatacji technicznej powstawanie uszkodzeń przekładni

Z punktu widzenia eksploatacji technicznej powstawanie uszkodzeń przekładni związane jest z czasem oraz warunkami jej pracy i prowadzi to do stopniowej degradacji poszczególnych elementów lub całych układów bezpośrednio współpracujących ze sobą. W przypadku pracy przekładni zębatej oprócz typowego jej uszkodzenia, jakim może być wykruszenie, pęknięcie stopy lub zużycie pittingowe zęba, występować może równocześnie uszkodzenie łożyskowania wałów. W pracy podjęto problem występowania jednocześnie uszkodzeń koła zębatego oraz łożyska tocznego przekładni oraz przeprowadzono wstępną identyfikację tych uszkodzeń w złożonym sygnale diagnostycznym.

2. OPIS STANOWISKA I METODY POMIARÓW

Do badań kół zębatych i łożysk tocznych wykorzystano stanowisko mocy krążącej FZG (rys.1). Składa się ono z przekładni badanej (1), przekładni zamykającej (2), wału skrętnego (3), sprzęgła napinającego (4) oraz silnika napędzającego (5). Obciążenie kół zębatych zadaje się poprzez napięcie wałka skrętnego na sprzęgle napinającym.

Badania prowadzono przy prędkości obrotowej wału koła wynoszącej f_{o2} =15 i 30 Hz oraz przy obciążeniu jednostkowym zębów wynoszącym Q=2 i 3,85 MPa.



Rys. 1. Stanowisko mocy krążącej FZG Fig. 1. Power circulating gear testing machine FZG

Pomiary drgań wirujących wałów wykonano wibrometrem laserowym. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys.2.

W badaniach założono uszkodzenie koła zębatego w postaci wykruszenia jednego zęba koła oraz dwóch różnych uszkodzeń łożysk tocznych – bieżni wewnętrznej i zewnętrznej (rys.3). Uszkodzone elementy zamontowano na tym samym wale koła przekładni zębatej.

Koła zębate wykorzystane w badaniach miały następujące parametry: liczbę zębów zębnika 16, liczbę zębów koła 24, moduł 4,5 mm, szerokość zazębienia 20 mm, współczynnik przesunięcia zarysu zębnika x₁=0,864, współczynnik przesunięcia zarysu koła x₂=-0,5, odległość osi kół 91,5 mm.



- Rys. 2. Schemat układu pomiarowego: 1 badana przekładnia, 2 wibrometr laserowy, 3 czujniki położenia wałów, 4 - układ logiczny, 5 - analizator sygnałów DSPT SigLab, 6 - komputer PC
- Fig. 2. The diagram of measurement system: 1 the examined transmission (gear), 2 laser vibrometer, 3 - sensors of shaft's position, 4 - logic system, 5 - DSTP signal analyzer (SigLab), 6 - PC

Zadane uszkodzenie w postaci wykruszenia głowy zęba wynosiło 2 mm, co odpowiadało wskaźnikowi przyporu czołowego $\varepsilon_{\alpha} = 0.93$. Częstotliwość pojawiania się tego uszkodzenia w sygnale WA wynosiła zależnie od prędkości obrotowej f_{02} =15 oraz 30 Hz.



Rys. 3. Wykruszenie zęba koła oraz uszkodzone bieżnie łożysk (rysunek poglądowy) Fig. 3. Dropping off of a wheel's tooth and damaged tracks of rolling bearings

Występujące w łożyskach tocznych uszkodzenia w momencie przetaczania się przez nie elementów tocznych wywołują impulsy wpływające na poziom drgań. Powtarzalność tych impulsów zależy od miejsca występowania uszkodzenia, jego stopnia, ale również obciążenia łożyska oraz prędkości obrotowej jego pracy.

W badaniach wykorzystano łożyska kulkowe zwykłe 6307 zadając na ich bieżniach wewnętrznych i zewnętrznych jednostkowe uszkodzenia. Charakterystyczne częstotliwości pojawiania się uszkodzeń w sygnale obliczono z następujących zależności:

uszkodzenie pierścienia wewnętrznego

uszkodzenie pierścienia zewnętrznego

dla $f_{o2}=15$ Hz $f_{zewn}=45$ Hz dla $f_{o2}=30$ Hz $f_{zewn}=90,1$ Hz

gdzie:

z - liczba elementów tocznych,

fo2 - częstotliwość obrotowa wału,

d - średnica podziałowa łożyska [mm],

D - średnica kulki [mm],

 α – kąt działania łożyska [°].

3. ANALIZA POMIARÓW

Podstawową metodą analizy sygnałów wibroakustycznych jest szybka transformata Fouriera (FFT). Pomimo wielu wad, m.in. braku możliwości czasowego określenia efektów niestacjonarności w analizowanym sygnale – wykorzystywana jest obecnie do wstępnej analizy i obróbki sygnałów. Oparto na niej także dwie metody związane z powstawaniem sygnałów resztkowych (residual signal) i różnicowych (differential signal), które wykorzystywane są do wykrywania wykruszenia zęba przekładni zębatej.

W pracy zastosowano metodę analizy sygnałów w dziedzinie czasu i częstotliwości, którą jest transformata Wignera-Ville'a (WV). Oblicza się ją z następującej zależności:

$$WV(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) w(\tau) e^{-j2\pi i t} dt$$

gdzie:

x*(t) – sygnał urojony sprzężony z x(t), w(t) – funkcja wagi.

Transformata ma bardzo dobrą rozdzielczość w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz umożliwia rozróżnienie zjawisk modulacji amplitudowej i fazowej. Dzięki tym zaletom znalazła szerokie zastosowanie w diagnostyce przekładni zębatych [1-5].

Zmierzone sygnał drganiowe przekładni zębatej z występującymi uszkodzeniami analizować można zgodnie ze schematami przedstawionymi na rys.4 - 8.

$$f_{wewn} = \frac{z}{2} f_{o2} (1 + \frac{d}{D} \cos \alpha)$$

$$f_{zewn} = \frac{z}{2} f_{o2} (1 - \frac{d}{D} \cos \alpha)$$





- Analiza czasowo-
częstotliwościowaAnaliza czasowo-
częstotliwościowa
- Rys. 4. Analiza sygnału zorientowana na wykrywanie wykruszenia zęba
- Fig. 4. Analysis of a signal aimed at detection of tooth dropping off
- Rys. 5. Analiza sygnału zorientowana na wykrywanie uszkodzeń łożysk tocznych
- Fig. 5. Analysis of a signal aimed at detection of rolling bearing damages



Rys. 6. Realizacja filtra grzebieniowego nr I:

- linią ciągłą oznaczono filtrację dla sygnału resztkowego,
- linią przerywaną oznaczono filtrację dla sygnału różnicowego,
- foi częstotliwości obrotowe kół, k harmoniczna 1,2,3,...
- Fig. 6. Realization of comb filter no I:
 - the continual line means filtration for residual signal,
 - the dashed line means filtration for differential signal,
 - f_{oi} revolving frequencies of wheels, k harmonic 1,2,3, \ldots



- Rys. 7. Analiza sygnału zorientowana na wykrywanie uszkodzenia koła zębatego i łożyska tocznego
- Fig. 7. Analysis of a signal aimed at detection of tooth gear and rolling bearing



- Rys.8. Realizacja filtra grzebieniowego nr II i III:
 - linią ciągłą oznaczono analizowane częstotliwości sygnału
 - $f_{\text{ou}}-$ częstotliwość pojawiania się uszkodzenia koła zębatego,
 - f_{oi} częstotliwości obrotowe kół, k harmoniczna 1,2,3,...
- Fig.8. Realization of comb filter no II I III:
 - the continual line means analysis of signal frequency,
 - f_{ou} frequency of tooth gear damages,
 - f_{oi} frequency of wheels' revolving, k harmonic 1,2,3,...

Rysunki 9-14 przedstawiają analizy sygnałów dla złożonych przypadków uszkodzenia przekładni (pomiary przy f_{o2} = 30 Hz i Q=3,85 MPa). Na rysunkach 9 oraz 12 obliczenia wykonano stosując jedynie transformatę WV. Jak widać, rozkład sygnału w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej nie daje możliwości jednoznacznej identyfikacji występujących uszkodzeń.

Kolejne analizy sygnału wykonano zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.7. Na rysunkach 10 oraz 13 przedstawiono sygnały różnicowe uszkodzonego koła zębatego, a na rys. 11 oraz 14 uszkodzenia pierścienia wewnętrznego i zewnętrznego łożyska tocznego.



- Rys.9. Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań wykruszony ząb uszkodzony pierścień wewnętrzny łożyska, dla: a) t=0,48-0,52 [s], b) t=0,52-0,56 [s]
 Fig.9. Time-frequency transform VW of vibrations velocity – dropper off tooth-damaged
 - inner race of a bearing, for: a) t=0,48-0,52 [s], b) t=0,52-0,56 [s]



- Rys.10. Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań sygnału różnicowego uszkodzonego koła, dla: a) t=0,48-0,52 [s], b) t=0,52-0,56 [s]
- Fig.10. Time-frequency transform VW of vibrations velocity of a remainder signal of a damaged wheel, for: a) t=0,48-0,52 [s], b) t=0,52-0,56 [s]



- Rys.11. Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań sygnału uszkodzonego pierścienia wewnętrznego łożyska, dla: a) t=0,48-0,52 [s], b) t=0,52-0,56 [s]
- Fig.11. Time-frequency transform VW of vibrations velocity signal of a damaged inner race of the bearing, for: a) t=0,48-0,52 [s], b) t=0,52-0,56 [s]



- Rys.12. Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań wykruszony ząb uszkodzony pierścień zewnętrzny łożyska, dla: a) t=1,752-1,793 [s], b) t=1.793-1,832 [s]
- Fig.12. Time-frequency transform VW of vibrations velocity dropper off tooth-damaged outer race of the bearing, for: a) t=1,752-1,793 [s], b) t=1,793-1,832 [s]



- Rys.13. Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań sygnału różnicowego uszkodzonego koła, dla: a) t=1,752-1,793 [s], b) t=1,793-1,832 [s]
- Fig.13. Time-frequency transform VW of vibrations velocity of a remainder signal of a damaged wheel, for: a) t=1,752-1,793 [s], b) t=1,793-1,832 [s]



- Rys.14. Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań sygnału uszkodzonego pierścienia zewnętrznego łożyska, dla: a) t=1,752-1,793 [s], b) t=1,793-1,832 [s]
- Fig.14. Time-frequency transform VW of vibrations velocity signal of a damaged outer race of the bearing, for: a) t=1,752-1,793 [s], b) t=1,793-1,832 [s]

4. WNIOSKI

Zastosowanie metod analizy sygnałów wykorzystywanych w diagnozowaniu uszkodzeń jednostkowych (rys. 9 i 12) jest niewystarczające przy wykrywaniu złożonych uszkodzeń przekładni zębatej.

W pracy zaproponowano nową metodę analizy sygnałów zorientowaną na wykrywanie złożonych uszkodzeń przekładni zębatych (rys. 7). Wykorzystany w tej metodzie filtr grzebieniowy (rys. 8) umożliwił odseparowanie częstotliwości związanych z występującym uszkodzeniem. Transformata Wignera-Ville'a umożliwiła wizualizację występujących uszkodzeń w dziedzinie czasu i częstotliwości.

Wyniki analiz wskazują na możliwość separacji symptomów uszkodzeń w złożonych przypadkach uszkodzeń przekładni. Obecnie prowadzone są dalsze badania nad wykorzystaniem przedstawionej w pracy metody.

Literatura

- Łazarz B., Wojnar G.: Diagnozowanie lokalnych uszkodzeń łożysk tocznych w przekładni zębatej Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2003.
- Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Diagnostyka wibroakustyczna przekładni zębatych, Konferencja DIAG'2003.
- Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Wibroakustyczne symptomy uszkodzeń kół i łożysk tocznych przekładni zębatej. Biuletyn naukowo-techniczny. Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe. OBRUM nr 3, Gliwice 2003.
- 4. Łazarz B., Wojnar G., Figlus T.: Wykrywanie uszkodzeń łożysk w przekładni zębatej, Zeszyty Naukowe Politechnik Śląskiej, seria: Transport nr 46, 2002.
- 5. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Diagnostyka wczesnych stadiów rozwoju uszkodzeń kół zębatych. DIAGNOSTYKA vol.24, 2001.

Abstract

The paper presents diagnosis of complex cases of tooth gear damages. The analysis took advantage of comb filtration aimed at detection of wheel and rolling bearing damages, as time-frequency visualization (pseudo analysis Wigner-Ville's transform) of the vibro-acoustic signal received.

The active experiment some damages such as dropping off of wheel's tooth and damage inner and outer races of the rolling bearing. The measurements of shaft's lateral velocity vibration were done by means of laser vibrometer.

The received results of analysis indicate the possibility of separation of tooth gear damage symptoms.