

ZASTOSOWANIE METOD WIBROAKUSTYCZNYCH DO DIAGNOZOWANIA ZŁOŻONYCH PRZYPADKÓW USZKODZEŃ PRZEKŁADNI ZĘBATYCH

Tomasz FIGLUS, Andrzej WILK

Katedra Budowy Pojazdów Samochodowych, Wydział Transportu, Politechnika Śląska
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, e-mail: figlus@polsl.katowice.pl, wilk@polsl.katowice.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono zagadnienie lokalizacji złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych, na podstawie badań stanowiskowych. W eksperymencie czynnym symulowano równocześnie lokalne uszkodzenie koła zębatego oraz uszkodzenia łożysk tocznych.

Analizy sygnałów wykonano stosując metody wykorzystywane dotychczas w wykrywaniu uszkodzeń przekładni zębatych oraz proponowaną metodę, która wykorzystuje filtrację grzebieniową.

Słowa kluczowe: diagnostyka, uszkodzenia kół zębatych, uszkodzenia łożysk tocznych, filtracja sygnału.

IMPLEMENTATION OF VIBRO-ACOUSTIC METHODS IN DIAGNOSIS COMPLEX CASES OF GEAR TRANSMISSION DAMAGE

Summary

In the paper there is presents a method localizing complex cases of gear transmission damage on the base of research work. In the active experiment, both a local damage of tooth gear and a rolling bearing damage were simulated at the same time.

The signal was analysed by using actual methods of signal processing and a proposed method of comb filtration.

Keywords: diagnostics, tooth gear damage, rolling bearing damage

1. WSTĘP

Zastosowanie metod wibroakustycznych w diagnostyce przekładni zębatych wpłynęło na rozwój analiz sygnałów, pozwalających na wykrywanie uszkodzeń oraz w niektórych przypadkach określenie stopnia ich rozwoju. Podstawą tych metod, opracowanych dla pojedynczych przypadków uszkodzeń przekładni, są analizy sygnałów w dziedzinie czasu, częstotliwości [1], czasu i częstotliwości [2,3] oraz czasu i skali częstotliwości [4].

W badaniach obiektów rzeczywistych diagnosta spotyka się z różnymi fazami zużycia i uszkodzeń elementów przekładni. Przedstawiane w literaturze wytyczne do prowadzenia pomiarów i interpretacji wyników w przypadku uszkodzeń pojedynczych elementów, mogą być niewystarczające do prawidłowej diagnozy złożonych uszkodzeń. Metody diagnozowania przekładni umożliwiają powinnny określanie stanu technicznego różnych niezależnych elementów np. stanu współpracujących kół, jak i łożysk tocznych.

Pozostawienie nierozwiązanym zagadnienia diagnozowania złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych skłoniło autorów do podjęcia badań nad tym zjawiskiem. W pierwszym etapie

zrealizowano badania stanowiskowe, podczas których symulowano różne wartości wykruszenia zęba koła oraz uszkodzenia bieżni zewnętrznych lub wewnętrznych łożysk.

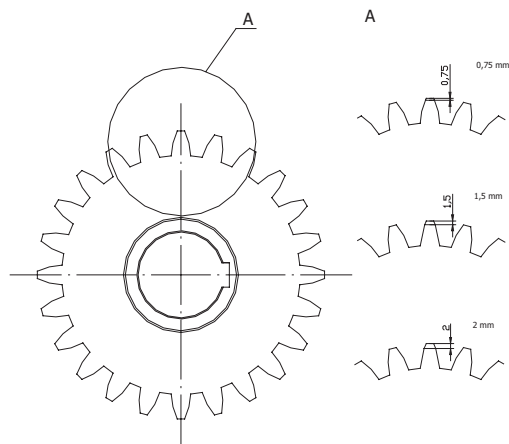
W pracy przedstawiono metodę wykrywania wykruszenia koła zębatego przekładni zębatej w złożonym sygnale drganiowym. W obliczeniach zastosowano filtr grzebieniowy przenoszący pasma zawierające harmoniczne częstotliwości obrotów uszkodzonego koła, a do dalszych analiz wykorzystano transformatę Wignera-Ville'a.

2. ZAŁOŻENIA DO BADAŃ

Badania wykonano na stanowisku mocy krążącej FZG. Pomiary przeprowadzono wibrometrem laserowym mierząc prędkość drgań poprzecznych wału, na którym osadzono uszkodzone koło zębate oraz łożysko toczne. Częstotliwość obrotowa wału koła wynosiła $f_{o2}=30$ Hz.

Do badań wykorzystano koła zębate o zębach prostych o parametrach: liczba zębów zębniaka 16, liczba zębów koła 24, moduł 4,5 mm, szerokość zazębienia 20 mm, współczynnik przesunięcia zarysu zębniaka $x_1=0,864$, współczynnik przesunięcia zarysu koła $x_2=-0,5$, odległość osi kół 91,5 mm.

W badaniach symulowano wykruszenie wierzchołka jednego zęba koła o trzech różnych wartościach (Rys.1). Uszkodzenie to spowodowało zmniejszenie czołowego wskaźnika przyporu od wartości 1,32 do wartości podanych w tabeli 1.

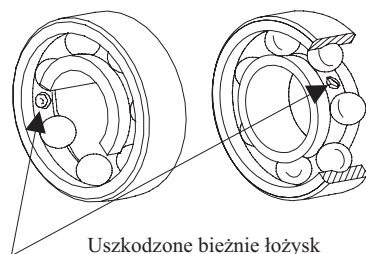


Rys. 1. Rozpatrywane przypadki wykruszenie zęba koła

Tabela 1. Wpływ wykruszenia na zmianę czołowego wskaźnika przyporu

Wykruszenie zęba [mm]	Czołowy wskaźnik przyporu ϵ_α [-]
0	1,32
0,75	1,18
1,5	1,03
2.0	0,93

Do podparcia wału koła wykorzystano trzy łożyska kulkowe zwykłe 6307. Na dwóch łożyskach zadano uszkodzenie w postaci rowka o szerokości ok. 2 mm – odpowiednio na bieżni zewnętrznej oraz wewnętrznej – w jednym miejscu na obwodzie; a trzecie – bez uszkodzenia – wykorzystano do pomiarów sygnałów bazowych (Rys.2). Przyjęty w eksperymencie rodzaj zużycia, symuluje przypadek początkowej fazy łuszczenia bieżni łożyska [5].



Rys. 2. Uszkodzenia bieżni łożysk

Charakterystyczne częstotliwości pojawiania się uszkodzeń w sygnale obliczono z zależności (1) i (2) [6]:

$$- \text{uszkodzenie bieżni wewnętrznej} \\ f_{\text{wewn}} = \frac{z}{2} f_{o2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \quad (1)$$

- uszkodzenie bieżni zewnętrznej

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

gdzie:

z – liczba elementów toczych, f_{o2} – częstotliwość obrotowa wału, d – średnica podziałowa łożyska [mm], D – średnica kulki [mm], α – kąt działania łożyska [°].

Częstotliwości pojawiania się tych uszkodzeń w sygnale WA przy $f_{o2}=30$ Hz wynosiły odpowiednio: dla uszkodzenia bieżni wewnętrznej 130,1 Hz, a dla bieżni zewnętrznej 90,1 Hz.

3. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

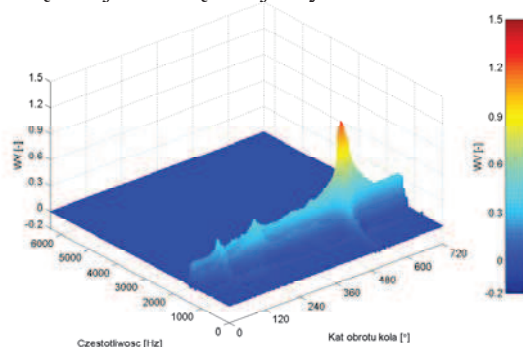
W początkowych analizach, przeprowadzono ocenę przydatności transformaty Wignera-Ville'a (3) [2,3,7,8,9], w diagnozowaniu złożonych przypadków uszkodzeń przekładni.

$$WV(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) w(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (3)$$

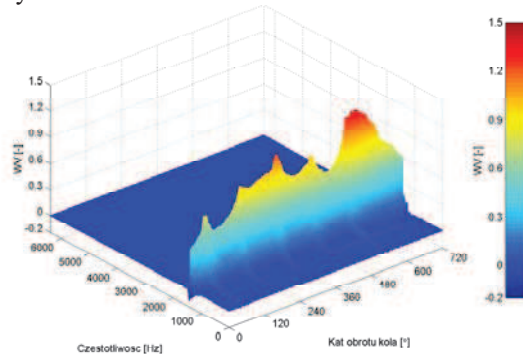
gdzie:

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

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono rozkład WV prędkości drgań sygnału z wykruszeniem koła 2 mm i odpowiednio uszkodzeniem bieżni zewnętrznej i wewnętrznej łożyska.



Rys. 3. Rozkład WV prędkości drgań sygnału – wykruszony ząb – uszkodzona bieżnia wewnętrzna łożyska

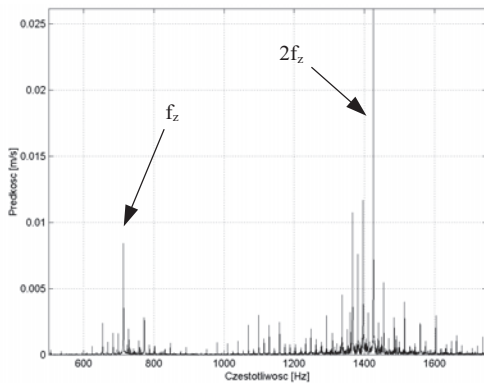


Rys. 4. Rozkład WV prędkości drgań sygnału – wykruszony ząb – uszkodzona bieżnia zewnętrzna łożyska

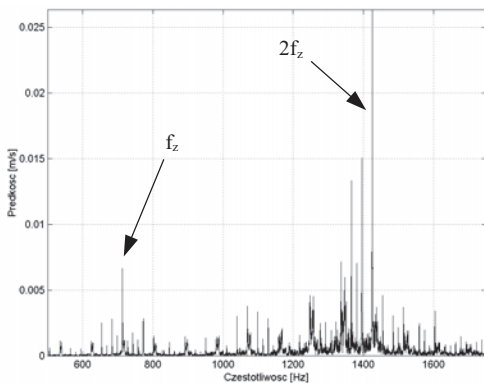
Występujące w rozkładach czasowo-częstotliwościowych znaczne wzrosty amplitudy sygnałów

nie można powiązać z charakterystycznymi częstotliwościami modelowanych uszkodzeń koła zębatego i łożyska tocznego.

Celem określenia wpływu badanych uszkodzeń na zmianę sygnału w dziedzinie częstotliwości wykonano widma sygnałów. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono zmiany sygnału prędkości drgań w przypadku, gdy w przekładni montowano uszkodzone koło zębate oraz dobre i uszkodzone łożysko toczne. W przypadku złożonego uszkodzenia przekładni największy wzrost amplitudy sygnału występuje w paśmie częstotliwości zbliżonym do drugiej harmonicznej ząbienia. W widmie występuje szerokopasmowa modulacja o znacznej energii generowana przez uszkodzenie łożyska. Modulacja ta powoduje, że niemożliwe jest wykrywanie uszkodzenia koła zębatego zarówno w widmie, jaki i w przedstawionym wcześniej rozkładzie Wignera-Ville'a.



Rys. 5. Uszkodzenie koła zębatego – łożysko dobre f_z – częstotliwość ząbienia

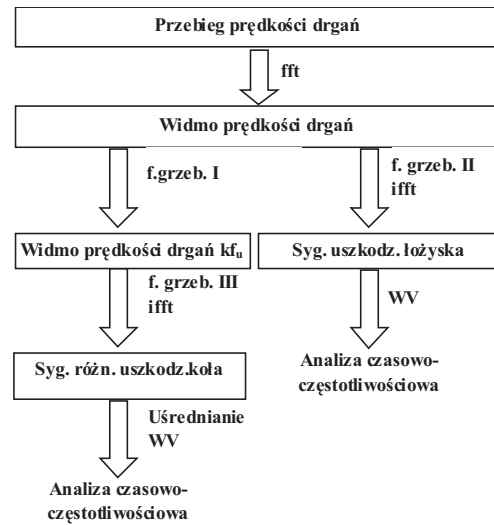


Rys. 6. Uszkodzenie koła zębatego – uszkodzona bieżnia zewnętrzna łożyska f_z – częstotliwość ząbienia

Na tej podstawie wyciągnięto wniosek, iż zastosowanie analizy Wignera-Ville'e oraz sygnału różnicowego [7] bez wstępnej filtracji może być mało efektywne.

Dalsze analizy wykonano stosując metodę filtracji widma – fft (Rys.7).

W metodzie tej, do lokalizacji uszkodzenia koła zębatego stosuje się filtry, przenoszące pasma częstotliwości, które obejmują szerokopasmową modulację sygnału $kf_u = kf_{o2}$ – filtr grzebieniowy I.



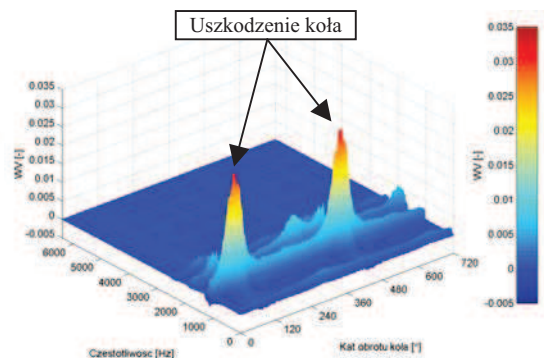
Rys. 7. Analiza sygnału zorientowana na wykrywanie uszkodzenia koła zębatego i łożyska tocznego

Następnie wyznacza się sygnał różnicowy – filtr grzebieniowy III – w którym usunięto harmoniczne częstotliwości ząbienia f_z wraz ze „wstęgami bocznymi”. Tak otrzymany sygnał poddawać można dalszym analizom.

Algorytm zaprezentowany na rysunku 7 umożliwia także określenie stanu łożysk tocznych w złożonym sygnale drganiowym. W przypadku tym, filtr grzebieniowy II przenosi wszystkie pasma częstotliwości z wyjątkiem obrotowych zębniaka i koła, i ich harmonicznych.

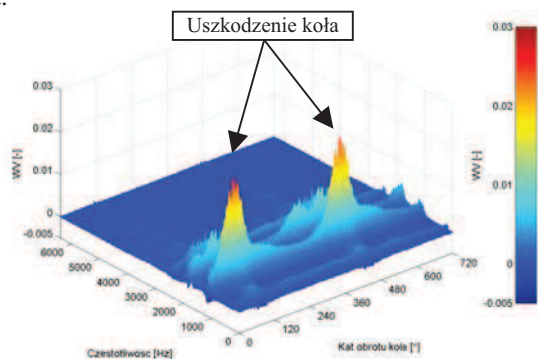
Pasma przenoszenia filtrów opisano i przedstawiono graficznie w pracach [8,9].

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono analizy sygnałów po filtracji, w której wykrywano uszkodzenie koła zębatego. Sygnały różnicowe poddano uśrednieniu okresem powtarzania się cyklu skojarzeń zębniaka i koła, a następnie obliczono transformatę WV.



Rys.8. Rozkład WV prędkości drgań sygnału różnicowego uszkodzonego koła - uszkodzona bieżnia wewnętrzna

Zarówno w przypadku przekładni, w której występują uszkodzenia koła i bieżni wewnętrznej łożyska, jak i zewnętrznej wzrost amplitudy sygnału odpowiada wejściu w przypór uszkodzonego zęba koła.



Rys.9. Rozkład WV prędkości drgań sygnału różnicowego uszkodzonego koła - uszkodzona bieżnia zewnętrzna

W wyniku przeprowadzonych analiz stwierdzono, że wykrycie mniejszych wartości wykruszenia zęba koła jest możliwe, lecz zmiana amplitudy transformaty Wignera Ville'a po filtracji generowana przez uszkodzenie jest znacznie mniejsza.

4. WNIOSKI

W referacie przedstawiono analizy sygnałów złożonych uszkodzeń przekładni zębatej otrzymanych w badaniach laboratoryjnych.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że zastosowanie metod stosowanych do wykrywania pojedynczych uszkodzeń przekładni jest niewystarczające przy złożonych stanach uszkodzeń.

Zaprezentowana w pracy metoda zorientowana na wykrywanie występujących jednocześnie uszkodzeń kół zębatych i łożysk tocznych umożliwiła wykrywanie symulowanego w badaniach uszkodzenia koła zębatego.

Obecnie prowadzone są dalsze badania nad diagnozowaniem tego typu uszkodzeń przekładni zębatych.

LITERATURA:

- [1] Cempel Cz.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN Warszawa 1989
- [2] Łazarz B., Wojnar G., Figlus T.: Wykrywanie uszkodzeń łożysk w przekładni zębatej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Transport nr 46, 2002
- [3] Wilk A. Łazarz B. Madej H.: Diagnostyka wibroakustyczna przekładni zębatych, Konferencja DIAG'2003

- [4] Batko W., Ziółko M.: Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej. Problemy inżynierii mechanicznej i robotyki. Monografie, Kraków 2002
- [5] Informacja produkcyjna SKF: Uszkodzenia łożysk i ich przyczyny. Copyright SKF, 2001
- [6] SKF Poradnik obsługi technicznej łożysk. Copyright SKF, 1994
- [7] Madej H.: Przetwarzanie sygnałów w diagnostyce przekładni zębatych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Transport nr 46, 2002
- [8] Figlus T., Wilk A.: Diagnozowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych. XXXI Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2004
- [9] Figlus T., Wojnar G.: Zastosowanie metod wibroakustycznych do wykrywania wykruszenia zęba w obecności uszkodzeń łożysk tocznych przekładni. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Seria: Transport. Gliwice 2003
- [10] 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
- [11] Wilk A. Łazarz B. Madej H.: Diagnostyka wczesnych stadiów rozwoju uszkodzeń kół zębatych. DIAGNOSTYKA vol.24. 2001



Mgr inż. Tomasz FIGLUS jest doktorantem w Katedrze Budowy Pojazdów Samochodowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej. Zajmuje się diagnozowaniem przekładni zębatych metodami wibroakustycznymi.



Prof. dr hab. inż. Andrzej WILK jest Kierownikiem Katedry Budowy Pojazdów Samochodowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej oraz Członkiem Zarządu Towarzystwa Diagnostyki Technicznej. Zajmuje się diagnozowaniem napędów zębatych metodami wibroakustycznymi oraz badaniami dynamicznymi układów napędowych z przekładniami zębatymi.