ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: TRANSPORT z. 57 Nr kol. 1675

Tomasz FIGLUS, Andrzej WILK

ZASTOSOWANIE ANALIZ WIDMA OBWIEDNI SYGNAŁU DRGANIOWEGO DO WYKRYWANIA WYKRUSZENIA ZĘBA KOŁA W OBECNOŚCI USZKODZEŃ ŁOŻYSK TOCZNYCH PRZEKŁADNI

Streszczenie. W pracy przedstawiono zastosowanie widma obwiedni sygnału drganiowego do diagnozowania złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych. Badania wykonano na stanowisku mocy krążącej. Podczas eksperymentu czynnego rejestrowano drgania emitowane przez przekładnię, w której symulowano różne wartości wykruszenia zęba w obecności uszkodzeń łożysk tocznych. Analizowany sygnał drganiowy poddano wstępnej obróbce stosując odpowiednią filtrację oraz uśrednianie synchroniczne, przedstawione w [1,2].

THE USE OF ENVELOPE SPECTRUM ANALYSIS OF VIBRATION SIGNAL FOR DETECTING OF DROPPING OFF TOOTH IN PRESENCE OF DAMAGES OF ROLLING BEARINGS

Summary. In the paper presents the use of envelope spectrum analysis of vibration signal to diagnosis complex cases gear transmission damage. The experiment has been examined of power circulating gear testing machine. During examination vibration of gear was recorded. Difference worth dropping off a wheel's tooth in presence of damages of rolling bearing was simulated.

1. WSTĘP

Do diagnozowania uszkodzeń przekładni zębatych wykorzystuje się z powodzeniem metody analiz sygnałów drganiowych oparte zarówno na analizach w dziedzinie czasu [3], częstotliwości [4,5,6], jak i czasu i częstotliwości [7]. Prezentowane w wielu publikacjach wyniki badań umożliwiły opracowanie różnych miar, dzięki którym można analizować stan kół zębatych [8] oraz łożysk tocznych [4]. Zastosowanie tych miar umożliwia wykrywanie m.in. wczesnych stadiów uszkodzeń kół zębatych w przypadku, gdy pozostałe elementy przekładni są w dobrym stanie. Autorzy publikacji zaproponowali już kilka metod diagnozowania złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych [1,2,9], których celem było ustalenie stanu kół w obecności uszkodzeń innych elementów przekładni.

Poszukiwanie kolejnych zastosowań różnych metod analizy sygnałów do diagnozowania kół zębatych było podstawą do podjęcia badań zaprezentowanych w niniejszej publikacji.

2. WIDMO OBWIEDNI

Przekształcenie Hilberta jest często stosowane do analizy sygnałów drganiowych [6,10]. Podstawą przekształcenia jest zależność (1) [11]:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \tag{1}$$

gdzie:

$x(\tau)$ - analizowany sygnał czasowy,

τ - czas ,

t - zmienna czasowa.

Na podstawie znajomości sygnału rzeczywistego x(t) i jego transformaty Hilberta $\hat{x}(t)$ obliczyć można *sygnał analityczny* z zależności (2) [11]:

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \tag{2}$$

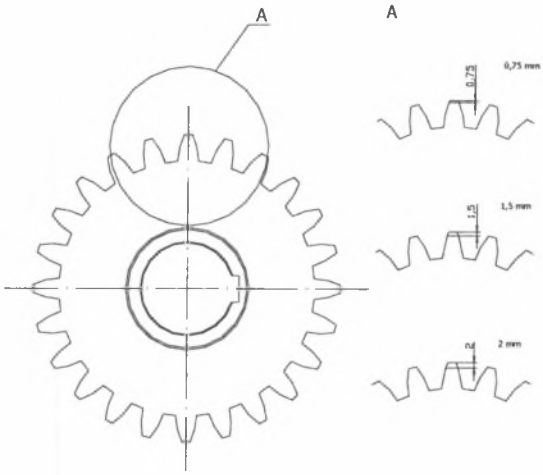
Sygnał z(t) umożliwia obliczenie *amplitudy chwilowej sygnału* zwanej *obwiednią X(t)*, z zależności (3) [11]:

$$X(t) = |z(t)| = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)} \tag{3}$$

Na podstawie sygnału amplitudy chwilowej X(t) oblicza się szybką transformatę Fouriera (fft) i uzyskuje *widmo obwiedni sygnału drganiowego.*

3. BADANIA STANOWISKOWE

Badania wykonano na stanowisku mocy krążącej FZG [1,2,9]. W badaniach symulowano trzy przypadki wykruszenia wierzchołka jednego zęba koła (rys.1). Uszkodzenie to spowodowało zmniejszenie czołowego wskaźnika przyporu od wartości 1,32 do wartości podanych w tabeli 1.



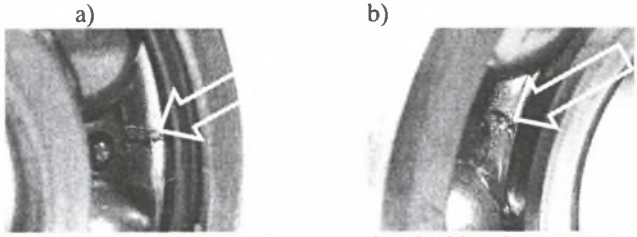
Rys.1. Rozpatrywane przypadki wykruszenie zęba koła
Fig.1. Examine case of dropping off wheel's tooth

W badaniach wykorzystano łożyska kulkowe, w których symulowano miejscowe uszkodzenia bieżni zewnętrznej lub wewnętrznej (rysunek 2). Uszkodzenia łożysk spowodowały wystąpienie impulsów wysokoenergetycznych utrudniających identyfikację

uszkodzenia koła zębatego [2]. Zaprogramowane uszkodzenia łożysk odpowiadały tym, które mogą wystąpić podczas ich eksploatacji [12,13].

Tabela.1.
Wpływ wykruszenia na zmianę czołowego wskaźnika przyporu

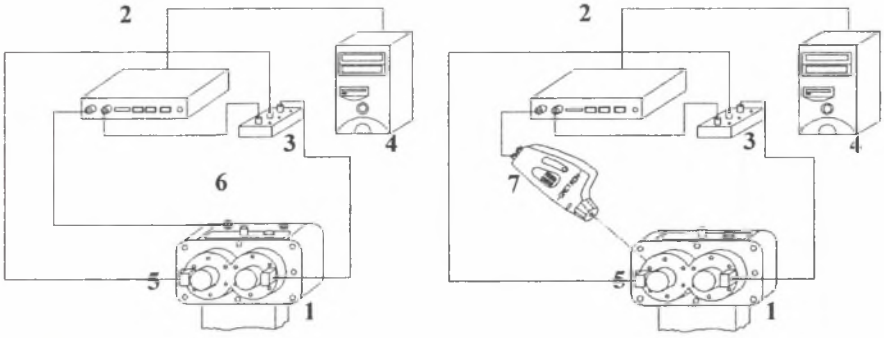
Wykruszenie zęba [mm]	Czołowy wskaźnik przyporu ε_α [-]
0	1,32
0,75	1,18
1,5	1,03
2,0	0,93



Rys.2. Uszkodzenia łożysk tocznych: a) uszkodzenie bieżni zewnętrznej, b) uszkodzenie bieżni wewnętrznej
Fig.2. Bearings damage: a) outer race, b) inner race

Na podstawie wzorów zamieszczonych w [3,13] obliczono charakterystyczne częstotliwości wystąpienia uszkodzenia łożysk. Wynoszą one: dla bieżni zewnętrznej 90,1 Hz, a dla bieżni wewnętrznej 130,1 Hz.

Do rejestracji sygnałów drganiowych wykorzystano układy pomiarowe przedstawione na rysunku 3.

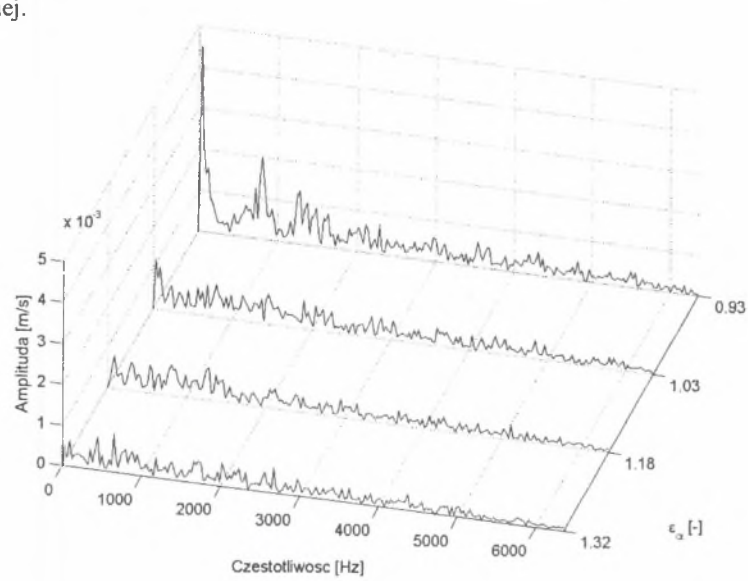


Rys.3. Schematy układów pomiarowych: 1 – badana przekładnia, 2 – analizator sygnałów DSTP SigLab, 3 – układ logiczny, 4 – komputer PC, 5 – czujniki położenia wałów, 6 – czujnik piezoelektryczny, 7 – wibrometr laserowy
Fig.3. The diagram of measurement system: 1 - the examined transmission (gear), 2 - DSTP signal analyzer (SigLab), 3 - logic system, 4 - PC, 5 - sensors of shaft's position, 6 - accelerometer, 7- laser vibrometer

4. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

Do analiz sygnału drganiowego wykorzystano algorytm obliczeń zaprezentowany przez autorów w pracach [1,2,9]. Filtrowany i uśredniony we wstępnych obliczeniach sygnał drganiowy poddano następnie analizie obwiedni wg zależności (1)-(3).

Na rysunku 4 zamieszczono przykładowe wyniki obliczeń widma obwiedni dla przypadku, gdy w przekładni zabudowano łożyska toczne z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej.



Rys.4. Widma obwiedni w zależności od wartości liczby przyporu ε_α – pomiar drgań wału przekładni przy obciążeniu przekładni Q=3,85MPa

Fig.4. Spectrum envelope in dependence of ε_α – measurement on shaft gearbox (load Q=3,85MPa)

W zaprezentowanych widmach drgań wystąpił wzrost amplitudy kilkudziesięciu harmonicznych częstotliwości obrotowych koła, którego ząb jest wykruszony. Zjawisko to obserwuje się również w pasmach sygnałów drganiowych zarejestrowanych w przypadku, gdy w przekładni montowano łożysko dobre lub uszkodzone. Również analizy sygnałów drganiowych obudowy przekładni wskazują na podobne symptomy wykruszenia zęba występujące w widmie obwiedni.

Do określenia zmian składowych widma obwiedni zaproponowano miarę SWWO określoną zależnością (4):

$$SWWO = \sum_{i=1}^{K} \omega(i) \tag{4}$$

gdzie:

i – dyskretny numer składowej widma,

K – liczba dyskretnych składowych widma.

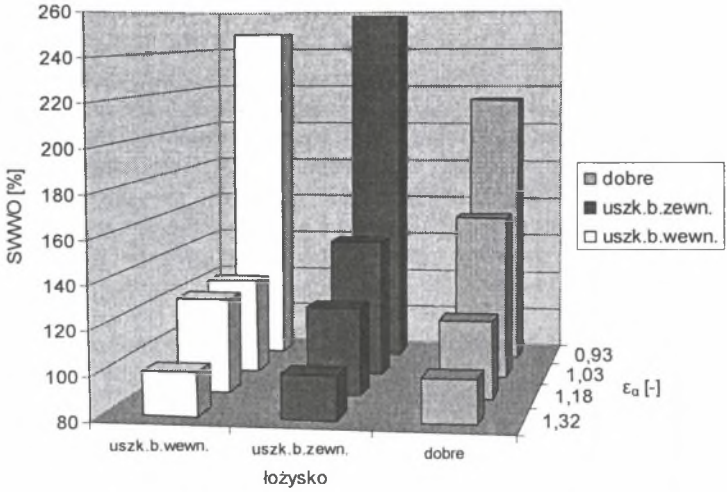
Na podstawie wstępnych badań stwierdzono, że pasmo częstotliwości $\omega \in (0,\ 0{,}9 \cdot f_z)$ [14] zawiera najwięcej informacji o uszkodzeniu lokalnym koła zębatego.

W tabeli 2 zaprezentowano obliczoną miarę SWWO dla wszystkich łożysk wykorzystanych w badaniach, a na rysunku 5 zmianę procentową tej miary.

Tabela 2

Miara SWWO – pomiar drgań wału przekładni – Q=3,85MPa

Pomiar	ε_a [-]	Łożysko		
		dobre	uszk. b.zewn.	uszk. b.wewn.
1	1,32	6,22E-03	6,08E-03	8,41E-03
2	1,18	7,27E-03	7,36E-03	1,04E-02
3	1,03	9,87E-03	8,86E-03	1,05E-02
4	0,93	1,33E-02	1,57E-02	2,09E-02



Rys.5. Zmiana procentowa miary SWWO w zależności od stosowanego łożyska – pomiar drgań wału przekładni – Q=3,85 MPa

Fig.5. Change of percentage SWWO in dependence of bearing – measurement on shaft gearbox (load Q=3,85 MPa)

Miara ta charakteryzuje się dużą wrażliwością na rosnące wykruszenie zęba koła. Niezależnie od stanu łożysk występuje wzrost tej miary już przy niewielkim wykruszeniu zęba założonym w eksperymencie, a tendencja ta została zachowana również w przypadku pomiarów sygnałów drganiowych obudowy przekładni.

5. PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają stwierdzić, że analiza widma obwiedni sygnału drganiowego poddanego uprzednio filtracji i uśrednianiu, generowanego przez przekładnię zębatą, pozwala diagnozować zaprogramowane w eksperymencie wykruszenia

zęba w obecności uszkodzeń łożysk tocznych. Zarówno pomiary drgań wału, jak i obudowy przekładni zawierają informacje pozwalające wykryć ten przypadek uszkodzenia zęba koła.

Analiza otrzymanych wyników badań wskazuje na celowość stosowania zaproponowanej miary SWWO do diagnozowania lokalnych uszkodzeń zębów koła przekładni niezależnie od stanu jej łożyskowania.

Obecnie prowadzone są dalsze badania nad zastosowaniem analizy widma obwiedni do diagnozowania zużycia powierzchni roboczej kół zębatych w obecności uszkodzeń łożysk tocznych.

Literatura

1. Figlus T., Wojnar G.: Zastosowanie metod wibroakustycznych do wykrywania wykruszenia zęba w obecności uszkodzeń łożysk tocznych przekładni. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej seria: Transport, z.48, s. 133-142, Gliwice 2003.
2. Figlus T., Wilk A.: Diagnozowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych. XXXI Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2004.
3. Cempel Cz.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN, Warszawa 1989.
4. Dwojak J., Rzepiela M.: Diagnostyka techniczna. Diagnostyka i obsługa techniczna łożysk tocznych. Poradnik. Biuro Gamma, Warszawa 2003 (Informacja produkcyjna).
5. Bartelmus W., Zimroz R.: Analiza widmowa drganiowych sygnałów diagnostycznych wielostopniowych przekładni zębatych. XXIX Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2002.
6. Radkowski S., Zawisza M.: Obwiednia sygnału wibroakustycznego jako parametr diagnostyczny zmęczeniowego uszkodzenia podstawy zęba w przekładni zębatej. Diagnostyka Maszyn. XXIX Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2002.
7. Baydar N., Ball A.: A comparative study of acoustic and vibration signals in detection of gear failures using Wigner-Ville distribution. Mechanical Systems and Signal Processing (2001) 15(6), 1091-1107.
8. Radkowski S.: Wykorzystanie SWA w diagnozowaniu zmęczeniowych uszkodzeń kół zębatych. II Seminarium Wibroakustyczna Diagnostyka Procesów Zmęczeniowych, s. 35-52, Warszawa, listopad 2002.
9. Figlus T., Wilk A., Folęga P.: Diagnozowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych z wykorzystaniem różnych technik pomiaru drgań. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Transport, z.56, Gliwice 2004, s. 161-168.
10. Zimroz R.: Metoda diagnostyki wielostopniowych przekładni zębatych w układach napędowych przenośników taśmowych z zastosowaniem modelowania. Rozprawa doktorska. Wrocław 2002.
11. Szabatin J.: Podstawy teorii sygnałów. Wydanie czwarte. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982, 2003.
12. SKF: Uszkodzenia łożysk i ich przyczyny. Copyrigth SKF, 2001.
13. SKF Poradnik obsługi technicznej łożysk. Copyrigth SKF, 1994.
14. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Metody przetwarzania sygnałów drganiowych w diagnozowaniu przekładni zębatych, 3rd International Congress of Technical Diagnostics, Diagnostics'2004, September 6-9, 2004, Poznań, Poland. Diagnostyka vol. 30, t. 2, 2004, 183-186.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Zbigniew Dąbrowski

Publikacja wykonana w ramach pracy 5T07B 02425