

DIAGNOZOWANIE WCZESNYCH STADIÓW ROZWOJU USZKODZEŃ KÓŁ ZĘBATYCH

Andrzej WILK, Henryk MADEJ, Bogusław ŁAZARZ

Instytut Transportu Politechniki Śląskiej
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, tel/fax: 032 255 45 53, e-mail: wilk@polsl.katowice.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań lokalnych uszkodzeń kół zębatych przeprowadzonych na stanowisku mocy krążącej FZG. Lokalne uszkodzenia jednego lub kilku zębów wywołują impulsowe efekty w sygnale drgań. Większość metod stosowanych w analizie drgań takich jak tradycyjna analiza widmowa, uniemożliwia wykrycie rozwoju uszkodzenia w jego początkowych stadiach. W badaniach zastosowano analizę czasowo częstotliwościową Wignera-Ville'a (WV). Jednoczesne przedstawienie sygnału drganiowego w dziedzinie czasu i częstotliwości umożliwia rozpoznanie efektów niestacjonarnych wywołanych uszkodzeniem. W analizach numerycznych wykorzystano środowisko programowe MATLAB.

Słowa kluczowe: koła zębate, drgania, analiza czasowo – częstotliwościowa, Matlab.

DIAGNOSIS OF LOCAL GEAR DAMAGE AT AN EARLY STAGE

Summary

The paper presents results of experimental tests, which have been carried out using power-circulating gear testing machine FZG. Faults localized in one or a few teeth produced dynamic effects that are typically transient and time localized. The most vibration analysis techniques, like spectral analysis, are unable to detect failure developing in gear at an early stage. A joint time-frequency analysis procedure using Wigner-Ville Distribution is also introduced to identify the location of the damaged tooth from the vibration signature. The joint time-frequency domain gives a comprehensive representation of the vibration signal and provides an interactive relationship between time and frequency within the signal allowing for phase and other changes in the signal to be highlighted. All of the computational analyses were done with the mathematical software package MATLAB.

1. WPROWADZENIE

Generowany przez przekładnię zębatą losowy sygnał drganiowy stanowi podstawowe źródło informacji o stanie zazębienia. Na aktywność wibroakustyczną przekładni mają wpływ czynniki konstrukcyjne, w tym przede wszystkim odchyłki wykonania zazębienia oraz zjawiska zużyciowe.

Z punktu widzenia diagnostyki istotne jest rozpoznanie w początkowych stadiach rozwoju zjawisk zmęzeniowych takich jak: wykruszenie warstwy wierzchniej, częściowe wyłamanie wierzchołka lub pęknięcie u podstawy zęba. Tradycyjna analiza widmowa daje jedynie informacje o średnich amplitudach częstotliwości analizowanego sygnału charakteryzując się dobrą rozdzielczością w dziedzinie częstotliwości i brakiem informacji w dziedzinie czasu. Metoda ta daje dobre wyniki w analizie sygnałów stacjonarnych, jednakże drgania generowane w zazębieniu posiadają również składowe o charakterze impulsowym.

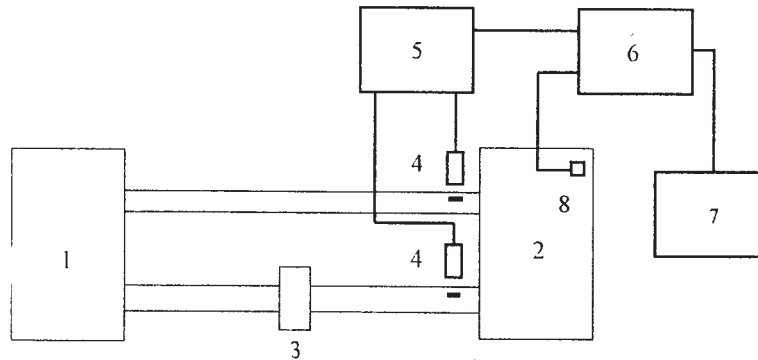
Lokalne uszkodzenia kół generują zaburzenia niestacjonarne sygnału drganiowego oraz modulację amplitudowo fazową [4,5,6] i mogą być

wykrywane poprzez jednoczesne określenie struktury czasowej i częstotliwościowej sygnału. Należy podkreślić, że początkowe fazy rozwoju uszkodzeń wywołujące te zaburzenia nie powodują wzrostu ogólnego poziomu drgań, co stwarza konieczność stosowania zaawansowanych metod analizy sygnałów [2,3,5,7].

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badania wpływu zaprogramowanych uszkodzeń kół na postać sygnału drganiowego prowadzono na stanowisku laboratoryjnym przedstawionym na rys. 1. Obiektem badań były koła o zębach prostych ($z_1 = 16$, $z_2 = 24$), w których wykonano uszkodzenia: pęknięcie u podstawy i wykruszenie wierzchołka zęba w różnych stadiach zaawansowania.

Drgania przekładni rejestrowano w wybranych punktach obudowy przy zadanej prędkości i obciążeniu kół. Zastosowany analizator sygnałów DSPT SigLab jest całkowicie zintegrowany z pakietem MATLAB i posiada możliwość wprowadzania bezpośrednio do przestrzeni roboczej wyników pomiarów zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości w zakresie do 20 kHz.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego.

- 1 – przekładnia zamykająca,
- 2 – przekładnia badana,
- 3 – sprzęgło napinające,
- 4 – czujniki położenia kątownego wałów,
- 5 – układ logiczny,
- 6 – analizator sygnałów DSPT SigLab,
- 7 – komputer,
- 8 – przetworniki przyspieszeń mocowane bezpośrednio na kole lub obudowie przekładni.

Zastosowany układ pomiarowy umożliwia analizę sygnału uśrednionego synchronicznie okresem obrotu wałów: zębniaka – T_z , koła – T_k oraz okresem powtarzania cyklu skojarzeń zębów – T_p . Uśrednianie synchroniczne sygnału eliminuje wpływ szumów losowych poprawiając stosunek sygnału do szumu. W przypadku diagnozowania przekładni wielostopniowych takie uśrednianie pozwala odseparować oddziaływania poszczególnych węzłów kinematycznych ułatwiając diagnozę.

3. METODY CZASOWO - CZĘSTOTLIWOŚCIOWE ANALIZY SYGNAŁÓW DRGAŃOWYCH

Wiele miar diagnostycznych stosowanych obecnie w badaniach przekładni zębatych opartych jest na analizie częstotliwościowej drgań. Podstawową techniką analizy częstotliwościowej jest transformata Fouriera. Jak już wspomniano wcześniej, wadą metody jest brak możliwości określenia czasu wystąpienia efektów wywołanych lokalnymi niestacjonarnościami sygnału. Niedogodność ta została częściowo usunięta w transformacie Gabora, która jest modyfikacją transformaty Fouriera. Z kolei uogólnieniem transformaty Gabora jest krótkoczasowe przekształcenie Fouriera STFT (Short Time Fourier Transform).

$$S(b, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot w(t-b) dt \quad (1)$$

W przekształceniu tym wprowadzono okno lokalizacyjne $w(t-b)$, w którym parametr b przesuwa okno w dziedzinie czasu. Funkcją okna może być dowolna funkcja spełniająca określone warunki. Okno to ze względu na stałą szerokość okazało się mało efektywne w analizie sygnałów zawierających jednocześnie składowe o niskiej i wysokiej częstotliwości.

Po wprowadzeniu dodatkowego parametru skali a do okna lokalizacyjnego w transformacie Gabora powstała transformata falkowa (Wavelet Transform).

Funkcja analizująca $\psi = \frac{t-b}{a}$, nazywana falką główną posiada współczynnik skali a , który powoduje zmianę czasu trwania falki oraz współczynnik przesunięcia b , który zmienia położenie falki na osi czasu. Równanie reprezentuje, więc filtrację pasmowo-przepustową sygnału za pomocą filtrów o różnych pasmach przepuszczania.

Transformata falkowa (WT) [5] jest funkcją dwuwymiarową:

$$WT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (2)$$

gdzie:

- a – parametr skali (częstotliwości),
- b – parametr translacji (przesunięcia w czasie),
- $a, b \in R, a \neq 0$

Podstawową zaletą transformacji falkowej jest optymalny kompromis w doborze rozdzielczości

w dziedzinie częstotliwości i czasu. Moduł transformacji falkowej sygnału przedstawia zmiany energii drgań w funkcji czasu i częstotliwości.

Teoria falek znajduje się od kilku lat w centrum zainteresowania zarówno matematyków jak i inżynierów, oprócz analizy czasowo-częstotliwościowej ma szerokie zastosowanie między innymi w dziedzinie analizy mowy, rozpoznawania obrazów oraz poprawiania jakości nagrań itp.

Oprogramowanie Wavelet Toolbox firmy MathWorks pracujące w środowisku MATLAB umożliwia między innymi realizacją ciągłej (CWT) i dyskretnej (DWT) transformaty falkowej.

Kolejną metodą analizy czasowo-częstotliwościowej struktury sygnału jest transformacja Wignera-Ville'a

$$WD(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) w(\tau) e^{-j2\pi ft} dt \quad (4)$$

gdzie:

- $x^*(t)$ – sygnał urojony sprzężony z $x(t)$,
- $w(t)$ – funkcja wagi podobna do okna czasowego stosowanego w krótkoczasowej transformacji Fouriera (STFT).

W przypadku transformaty STFT zwięzanie przedziału czasowego poprawia rozdzielczość czasową widma mocy pogarszając jednocześnie jego dokładność w dziedzinie częstotliwości, na skutek tak zwanego przecieku widma. W przeciwieństwie do STFT, której rozdzielczość w dziedzinach czasu i częstotliwości jest ograniczona z powodu stałej szerokości okna, rozkład WV ma bardzo dobrą rozdzielczość w obu dziedzinach. Dzięki tym cechom, transformata WV umożliwia rozróżnienie zjawisk modulacji amplitudowej i fazowej, co z punktu widzenia diagnostyki stanu ząbienia jest bardzo ważne. Z badań wynika, że podstawowe uszkodzenia wywołane eksploatacyjnym zużyciem zębów to:

- pitting,
- częściowe wyłamanie zębów,
- zatarcie,
- zużycie ściernie.

Uszkodzenia te wywołują jednocześnie modulacje amplitudy i fazy sygnału drganiowego. Charakter rozkładu czasowo częstotliwościowego ułatwia wnioskowanie diagnostyczne rozróżniając zjawiska zużyciowe oraz umożliwia ich wczesne wykrywanie

4. WYNIKI ANALIZY SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH

Badania przeprowadzono w celu sprawdzenia przydatności różnych metod analizy sygnałów drganiowych do wykrywania uszkodzeń kół

zębatach takich jak wyłamanie i pęknięcie zęba. Czynne eksperymenty diagnostyczne zostały poprzedzone badaniami symulacyjnymi. Podstawą tych badań był płaski model dynamiczny pary kół o zębach prostych [1]. Model umożliwia symulację pęknięcia zęba poprzez zmianę jego sztywności i wykruszenia zęba poprzez zmniejszenie długości odcinka przyporu. Rejestrowano i analizowano chwilowe wartości przyspieszeń drgań skrętnych kół.

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych i laboratoryjnych wynika, że uszkodzenia lokalne takie jak pęknięcie lub wykruszenie zęba wywołują impulsową modulację sygnału generowanego w ząbieniu nie powodując istotnego wzrostu ogólnego poziomu drgań.

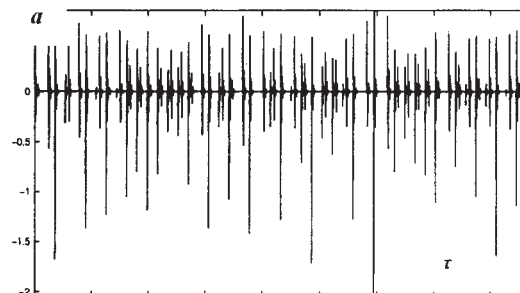
Za pomocą dyskretnej transformaty falkowej analizowano sygnały drgań otrzymane z badań symulacyjnych i eksperymentalnych [5]. Dyskretna transformata falkowa przedstawia sygnał w postaci liniowych kombinacji współczynników a_k i d_i . Ponieważ falka $\psi(t)$ ma charakter pasmowo przepustowy, więc współczynniki d_i zawierają informacje o wyższych częstotliwościach, natomiast współczynniki a_k zawierają informacje w zakresie niskich częstotliwości wraz ze składową stałą. DWT umożliwia tzw. dekompozycję wielopoziomą sygnału.

$$x(t) = a_k + \sum_{i=1}^k d_i \quad (3)$$

gdzie:

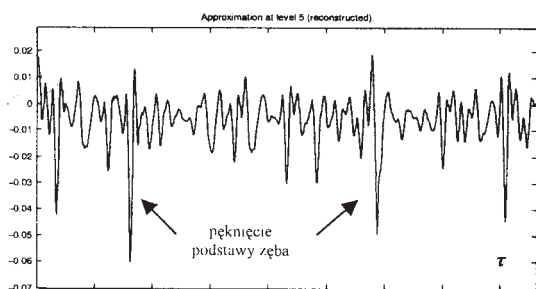
- $x(t)$ – sygnał oryginalny,
- a_k – przybliżenie sygnału na poziomie k ,
- d_i – detal na i -tym poziomie,
- i – poziom dekompozycji.

Na rysunku 2 przedstawiono przyspieszenia drgań skrętnych kół w przypadku symulacji pęknięcia zęba u podstawy przy jednoczesnym występowaniu odchyłek losowych podziałki. Występowanie tych odchyłek powoduje, że wykrycie i określenie momentu wystąpienia lokalnego uszkodzenia (pęknięcia zęba) jest bardzo trudne.



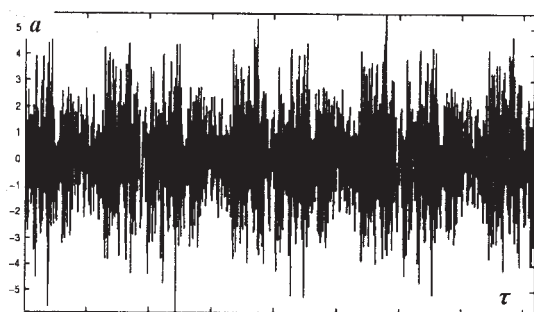
Rys. 2. Przyspieszenia drgań skrętnych kół (a) w przypadku pęknięcia zęba u podstawy dla kół z odchyłkami losowymi podziałki

Rysunek 3 przedstawia wyniki dekompozycji falkowej sygnału przyspieszeń drgań na poszczególne składowe. Do analizy zastosowano funkcję analizującą db4 z rodziny funkcji bazowych Daubechies [5].

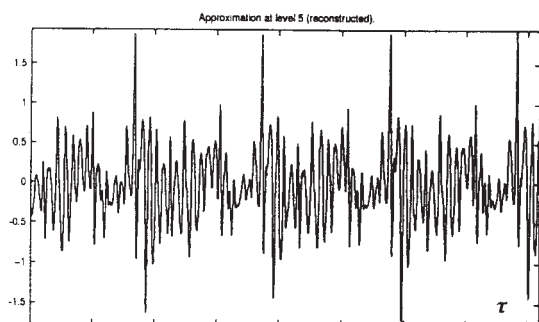


Rys.3. Wynik dekompozycji falkowej sygnału przyspieszenia drgań obwodowych kół w przypadku pęknięcia zęba przy jednoczesnym występowaniu odchyłek losowych podziałki.

Na kolejnym rysunku 4 przedstawiono przebieg czasowy przyspieszeń drgań skrętnych kół w przypadku pęknięcia zęba u podstawy zmierzony na stanowisku FZG, a na rysunku 5 wyniki dekompozycji analizy falkowej tego przebiegu.



Rys. 4. Przyspieszenia drgań skrętnych kół (a) w przypadku pęknięcia zęba u podstawy



Rys. 5. Rezultaty analizy falkowej przyspieszeń drgań skrętnych kół w przypadku pęknięcia zęba u podstawy

Analiza falkowa umożliwia wykrycie lokalnych uszkodzeń w obecności losowych błędów wykonania kół nawet w przypadku sygnału nieuśrednionego synchronicznie. Pozwala, więc na

wykrycie uszkodzenia kół w postaci pęknięcia lub wykruszenia zęba. Jednakże nie jest możliwe obecnie stworzenie diagnostycznego modelu odwrotnego, a więc ustalenie rodzaju uszkodzenia na podstawie symptomu [5].

Na rysunku 6 przedstawiono sygnał przyspieszeń drgań skrętnych z przetwornika umieszczonego bezpośrednio na uszkodzonym lokalnie kole. Sygnał został uśredniony synchronicznie za pomocą układu pomiarowego przedstawionego na rysunku 1. W tym przypadku jako sygnał synchronizujący zastosowano impulsy zgodne z czasem powtarzania cyklu skojarzeń zębów. Pomiar przyspieszeń drgań bezpośrednio na kole umożliwia identyfikację lokalnego uszkodzenia. Impulsy związane z wchodzeniem uszkodzonego zęba w przypór są szczególnie dobrze uwidocznione w przebiegu czasowym obwiedni sygnału przyspieszeń. W warunkach przemysłowych tego rodzaju pomiary są trudne do zrealizowania z powodu braku możliwości bezpośredniego pomiaru drgań wirującego koła. Należy podkreślić, że uśrednianie synchroniczne poprawia stosunek sygnału do szumu, jednak sygnał synchronizujący powinien być generowany z dokładnością wyższą niż czas próbkowania t_p .

Zastosowanie analizy czasowo-częstotliwościowej Wignera-Ville'a umożliwia wykrycie uszkodzenia lokalnego zarówno w przypadku sygnału uśrednionego jak i nieuśrednionego. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki analizy czasowo-częstotliwościowej przyspieszeń drgań zarejestrowanych na obudowie łożysk przekładni w przypadku wykruszonego zęba zębniaka.

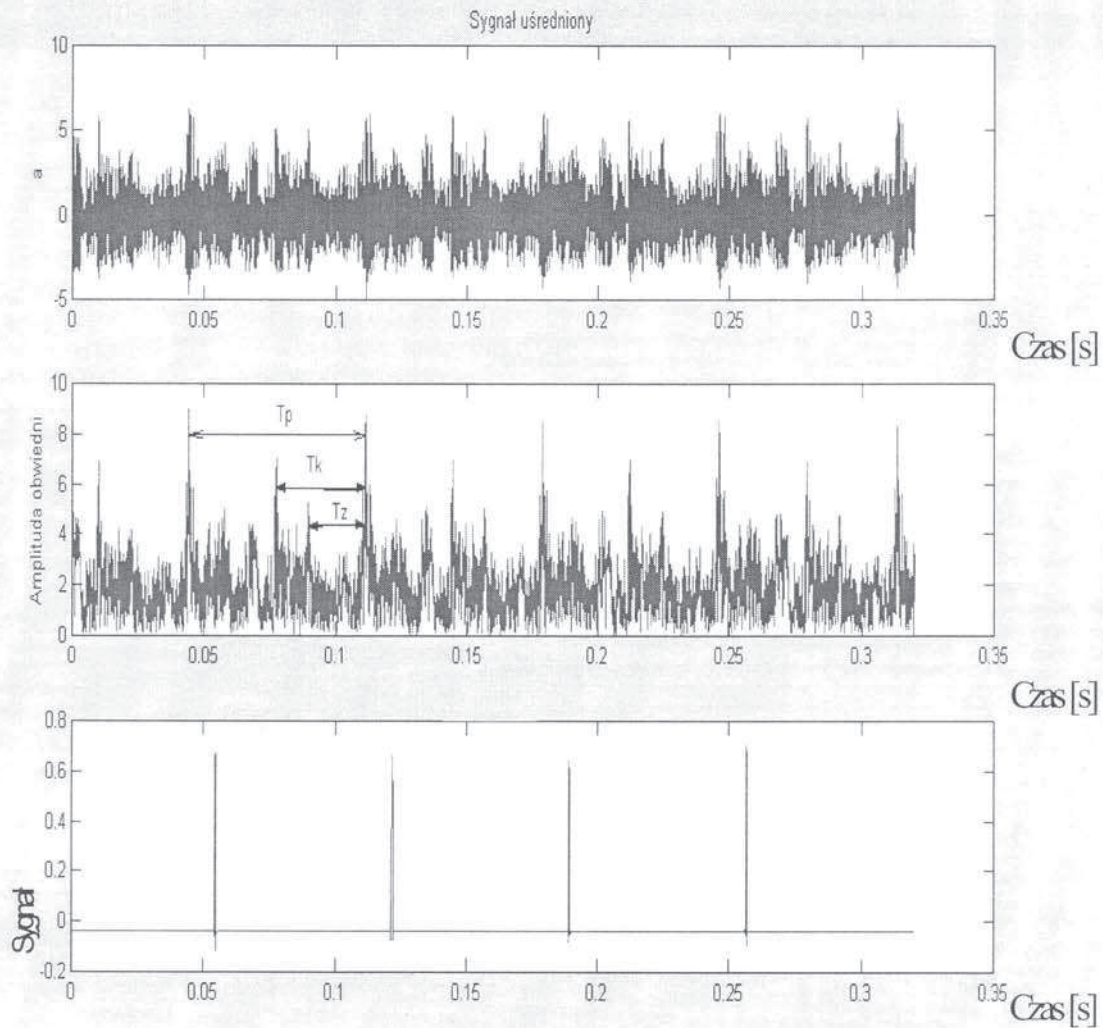
Górny wykres przedstawia zmiany współczynnika kurtozy w funkcji czasu. Współczynnik kurtozy (spłaszczenia) jest jedną ze znanych bezwymiarowych miar stosowanych w diagnostyce uszkodzeń przekładni zębatych. Współczynnik ten dla sygnału o rozkładzie Gaussa ma wartość 3.0. Wzrost wartości współczynnika świadczy o zmianie rozkładu sygnału w dziedzinie amplitudy. Podczas badań zauważono, że zmiany współczynnika kurtozy w oknie czasowym o odpowiednio dobranej szerokości N przesuwany wzdłuż osi czasu są dobrym symptomem lokalnych uszkodzeń kół. W tym przypadku jako miarę diagnostyczną proponuje się zmodyfikowany współczynnik kurtozy opisany wzorem:

$$K_j = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=j}^{j+N-1} (x_i - \bar{x}_j)^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=j}^{j+N-1} (x_i - \bar{x}_j)^2 \right]^2}, \quad (5)$$

gdzie:

$i, j = 1, 2, 3, \dots$,

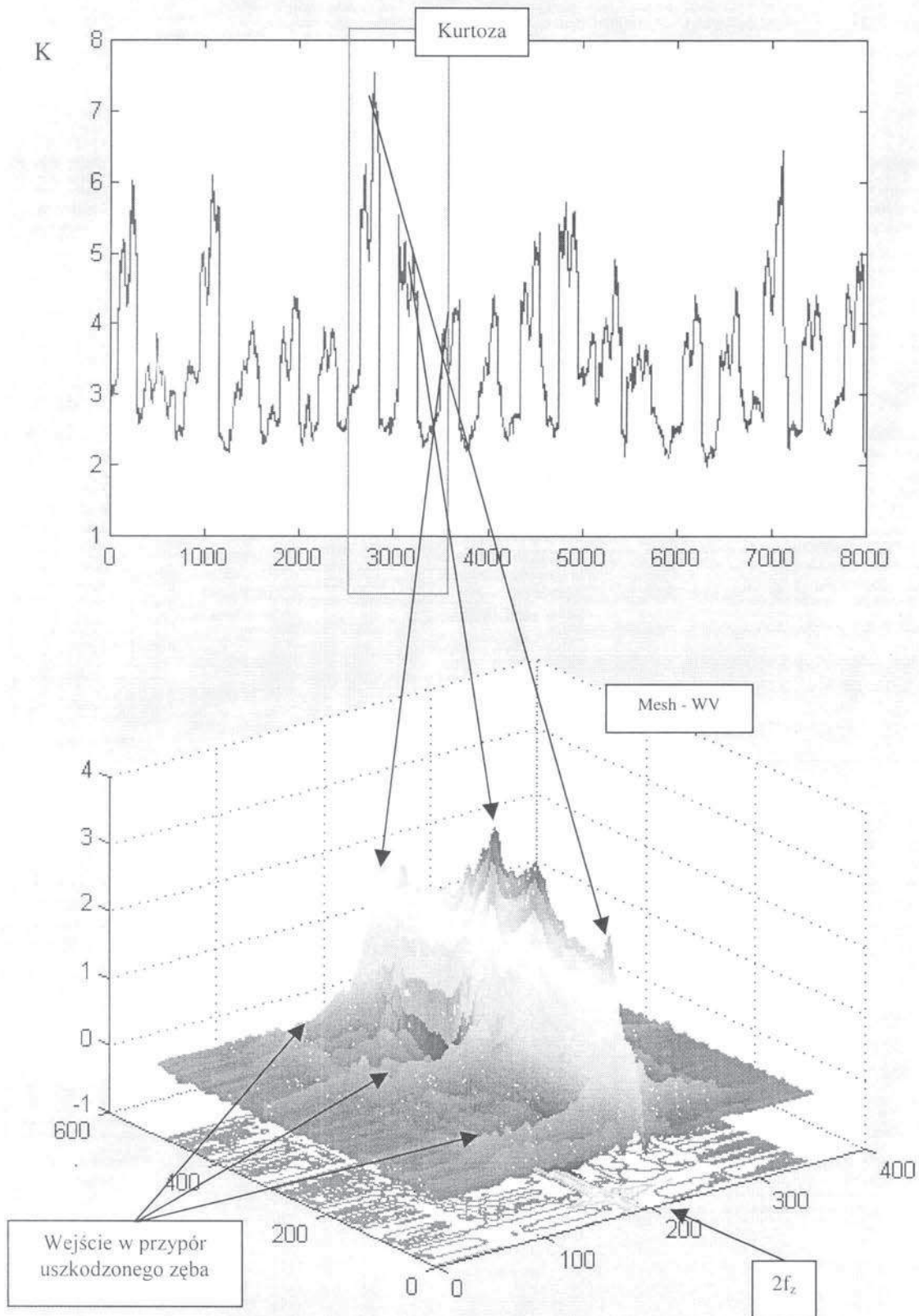
\bar{x}_j - wartość średnia sygnału w oknie czasowym o długości N próbek.



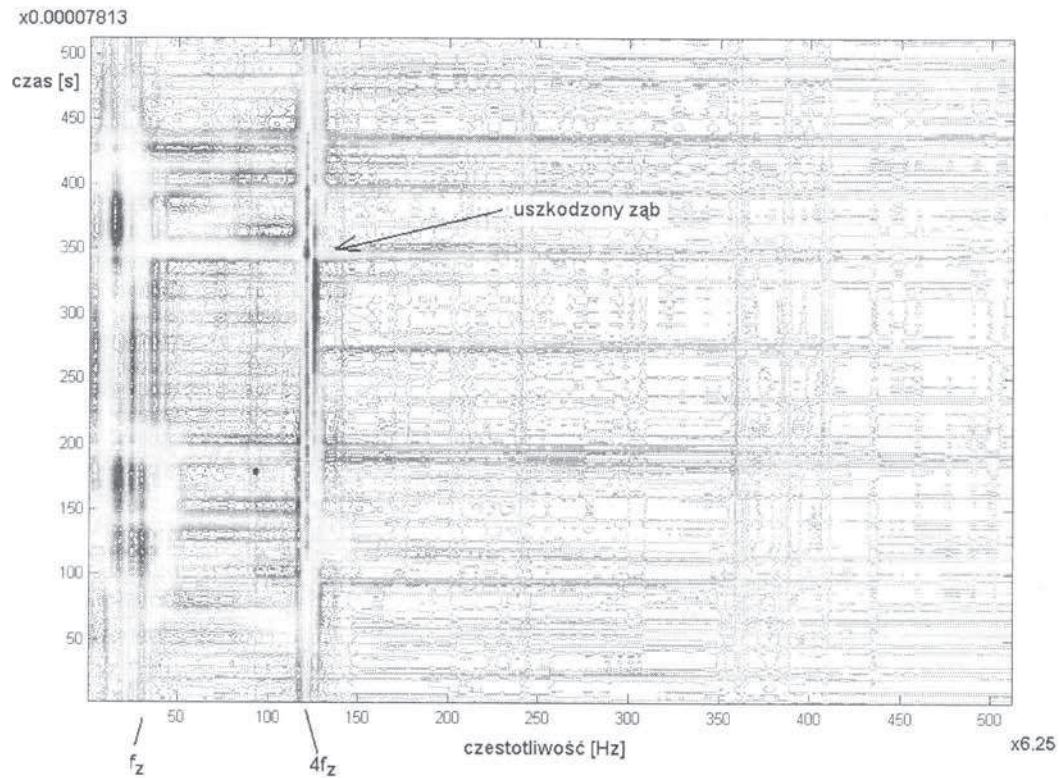
Rys. 6. Uśredniony synchronicznie sygnał przyspieszeń drgań skrętnych, obwiednia sygnału i sygnał synchronizujący – przetwornik umieszczony bezpośrednio na uszkodzonym kole.

Na dwóch kolejnych rysunkach przedstawiono dwa sposoby prezentacji wyników analizy czasowo-częstotliwościowych WV. Na rysunku 8 przedstawiono dwuwymiarowy konturowy natomiast na rysunku 9 trójwymiarowy wykres. Skala amplitudy jest obrazowana kolorem i dlatego w przypadku publikacji czarno białej bardziej czytelny jest wykres przestrzenny. Na przedstawionych rysunkach można rozróżnić zaburzenia spowodowane wchodzeniem zębów w przypór. Na rysunku 7 w paśmie $2f_z$ strzałkami zaznaczono lokalne ekstrema rozkładu WV wywołane wejściem w przypór uszkodzonego zęba. Jak wynika z rysunków 8 i 9 również w przypadku

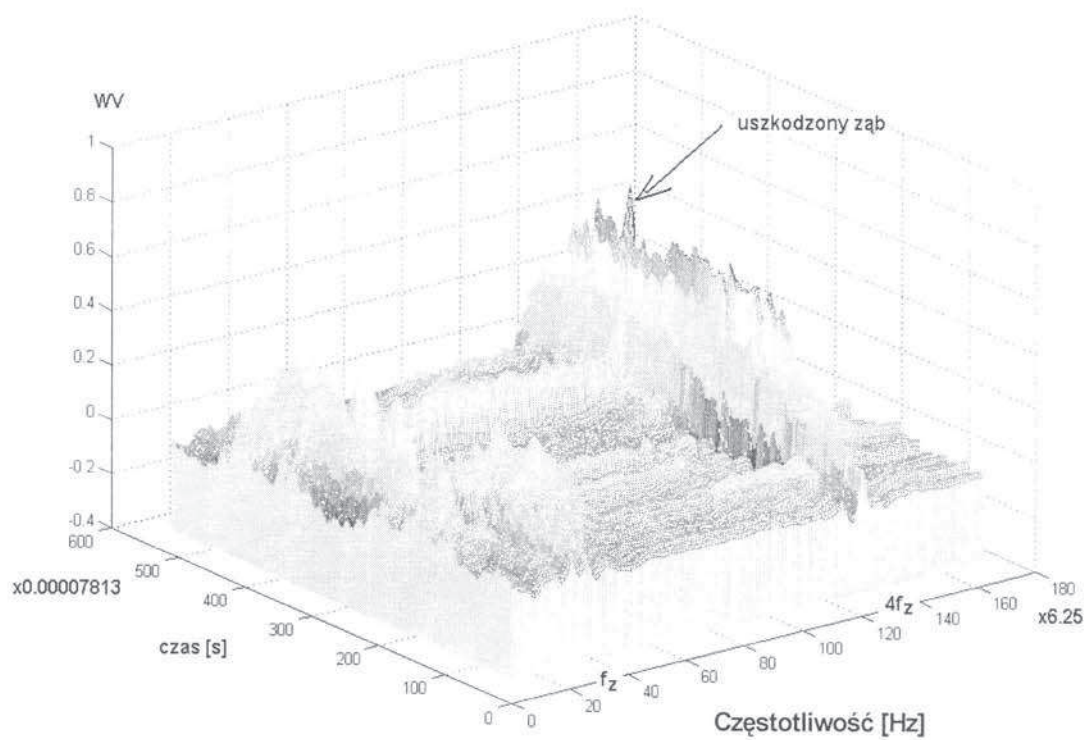
pęknięcia zęba u podstawy zaobserwowano lokalne ekstrema rozkładu WV widoczne w paśmie f_z i $4f_z$. Niestacjonarność sygnału w paśmie $4f_z$ jest obserwowana w dłuższym okresie czasu obejmującym wejście w przypór kolejnych zębów (rys. 8, 9). Efekty wejścia w przypór uszkodzonych lokalnie zębów są wyraźnie widoczne jednocześnie w dziedzinach częstotliwości i czasu. Pęknięcie zęba u podstawy wywołuje modulację fazową sygnału zazębienia, co uwidacznia się w rozkładzie czasowo-częstotliwościowym (rys.8, 9) w postaci niesymetrycznie rozłożonych wstęg bocznych.



Rys. 7. Zmiany współczynnika kurtozy K_f w funkcji czasu i rozkład WV dla przekładni z wykruszonym zębem zębnika, obciążenie $M = 138$ Nm, prędkość obrotowa $n = 2700$ obr/min, przetwornik umieszczony na korpusie łożyska koła, uśrednianie w okresie T_z .



Rys. 8. Czasowo-częstotliwościowy rozkład WV uśrednionego synchronicznie sygnału przyspieszeń drgań (w przypadku pęknięcia zęba u podstawy)



Rys. 9. Przestrzenny czasowo-częstotliwościowy rozkład WV uśrednionego synchronicznie sygnału przyspieszeń drgań (w przypadku pęknięcia zęba u podstawy)

5. WNIOSKI

Przedstawione wyniki potwierdzają przydatność analizy czasowo-częstotliwościowej do wykrywania zaburzeń sygnału wywołanych miejscowymi uszkodzeniami kół nawet w przypadku analizy sygnału nieuśrednionego synchronicznie.

Zastosowany współczynnik kurtozy K_f wyznaczany w przesuwanym oknie czasowym o odpowiednio dobranej szerokości jest symptomem wrażliwym na lokalne uszkodzenia kół.

Analiza Wignera-Ville'a jest użytecznym narzędziem do wykrywania impulsowych zaburzeń w szerokopasmowym widmie drgań. Przestrzenny rozkład WV sygnału przyspieszeń przekładni z lokalnymi uszkodzeniami dostarcza większą ilość informacji o rozkładzie energii drgań wywołanych uszkodzeniem. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że celowe jest stosowanie analizy WV do diagnozowania lokalnych uszkodzeń łącznie z klasycznymi metodami analizy sygnałów, które ułatwiają poprawną MATLAB interpretację wyników analizy WV.

LITERATURA

- [1] Dąbrowski Z., Radkowski S., Wilk A.: Dynamika przekładni zębatych. Warszawa-Katowice-Radom 2000.
- [2] Lee S. K., White P. R.: Detection of impulsive sound and vibration signal using the sliced Wigner fourth order moment spectra (SWFOMS). INTER-NOISE 99, Florida, USA.
- [3] Krishnappa G., Donovan M.: Some examples of signal analysis techniques to diagnose faults in machines. VI INTERNATIONAL CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION 1999, Copenhagen, Denmark.
- [4] Radkowski S.: Bispektralna analiza sygnału wibroakustycznego. Kongres Diagnostyki Technicznej, Gdańsk 1996.
- [5] Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Wavelet Analysis in Diagnosis of Selected Damages in Toothed Wheels. Machine Dynamic Problems, 1999, vol. 23, No 2, str. 45-53.
- [6] Wilk A., Madej H., Łazarz B.: Diagnostic of Industrial Gear. VI International Congress on Sound and Vibration, Copenhagen, Denmark 1999.
- [7] Wilk A., Madej H., Łazarz B.: Struktura częstotliwościowa widma drgań przekładni z lokalnie uszkodzonymi kołami XXVIII Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2001.



Andrzej Wilk - profesor w Instytucie Transportu Politechniki Śląskiej, dyrektor Instytutu.

Specjalizuje się w zakresie diagnostyki wibroakustycznej przekładni zębatych, wspomaganego komputerowo konstruowania napędów zębatych oraz budowy pojazdów samochodowych. Członek kilku Sekcji Komitetu Budowy Maszyn oraz Transportu, naukowych towarzystw krajowych i zagranicznych, w tym International Institute of Acoustics and Vibration (USA). Współzałożyciel i v-ce prezes Zarządu Głównego Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej.



Henryk Madej - adiunkt w Instytucie Transportu Politechniki Śląskiej. Specjalizuje się w zakresie wibroakustyki maszyn, diagnostyki przekładni zębatych, metod przetwarzania sygnałów oraz elektroniki i elektrotechniki samochodowej. Członek

Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej.



Bogusław Łazarz - adiunkt w Instytucie Transportu Politechniki Śląskiej. Specjalizuje się w zakresie diagnostyki wibroakustycznej przekładni zębatych, modelowania i wspomaganego komputerowo projektowania układów przeniesienia napędu z przekładnią zębatą oraz metod przetwarzania sygnałów. Członek Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej i Sekcji Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn.