

Andrzej **WILK**
Henryk **MADEJ**
Bogusław **ŁAZARZ**

ZASTOSOWANIE ANALIZY CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWEJ W DIAGNOZOWANIU LOKALNYCH USZKODZEŃ PRZEKŁADNI ZĘBATYCH

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych lokalnych uszkodzeń kół zębatach na podstawie modelu dynamicznego pary kół o zębatach prostych. Wyniki badań porównano z przeprowadzonymi eksperymentami na stanowisku mocy krążącej. W badaniach wykorzystano dekompozycję falkową sygnału drganiowego oraz analizę czasowo-częstotliwościową Wignera-Ville'a (WV). Badania wykazały, że dekompozycja falkowa oraz analiza WV umożliwiają identyfikację momentu wystąpienia lokalnych uszkodzeń kół, takich jak wykruszenie lub pęknięcie zęba.

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.

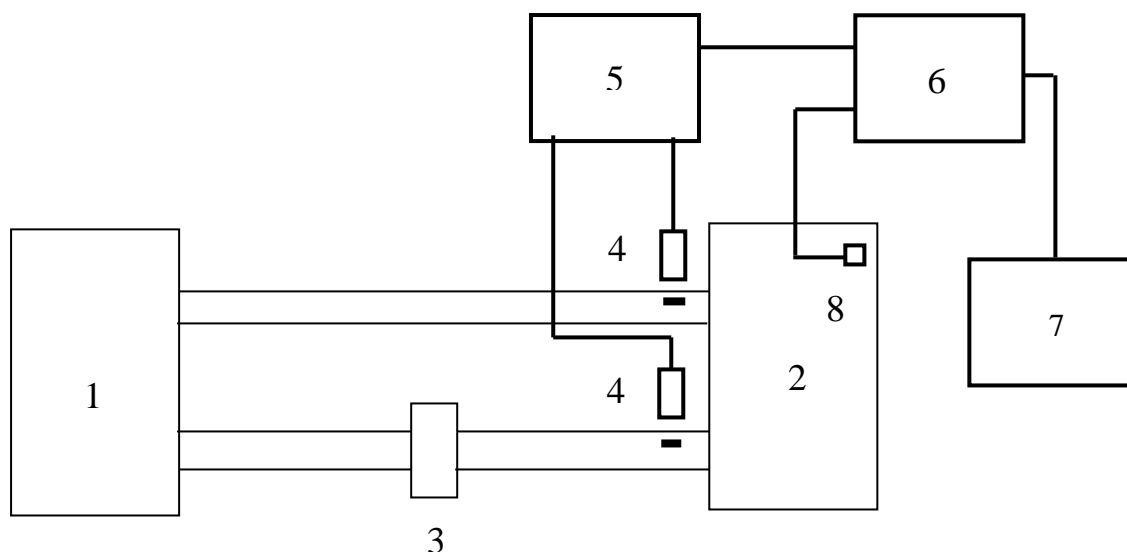
Z punktu widzenia diagnostyki istotne jest rozpoznanie w początkowych stadiach rozwoju zjawisk zmęczeniowych, takich jak: wykruszenie warstwy wierzchniej, częściowe wyłamanie wierzchołka lub pęknięcie zęba u podstawy. Tradycyjna analiza widmowa daje jedynie informacje o średnich amplitudach częstotliwości 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 wyżej wymienione 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 zębatach prostych ($z_1 = 16$, $z_2 = 24$), w których wykonano uszkodzenie: pęknięcie u podstawy i wykruszenie wierzchołka zęba.

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 od 0 do 20 kHz.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego.

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

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

3. METODY CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWE ANALIZY SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH

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 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) postaci:

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

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 postaci:

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

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 umożliwi między innymi realizację ciągłej (CWT) i dyskretnej (DWT) transformaty falkowej.

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 wielopoziomową sygnału według zależności:

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

gdzie:

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

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

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

gdzie:

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

W przypadku transformaty *STFT* zważanie 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 zazębienia jest bardzo ważne. Z badań wynika, że podstawowe uszkodzenia wywołane eksploatacyjnym zużyciem zębów to:

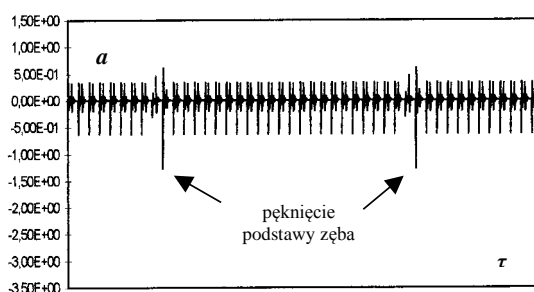
- pitting,
- częściowe wyłamanie zębów,
- zatarcie,
- zużycie ściernie.

Uszkodzenia te wywołują jednocześnie modulacje amplitudy i fazy sygnału drganiowego. Charakter rozkładu czasowo-częstotliwościowego ułatwia wnioskowanie diagnostyczne rozróżniając zjawiska zużyciowe.

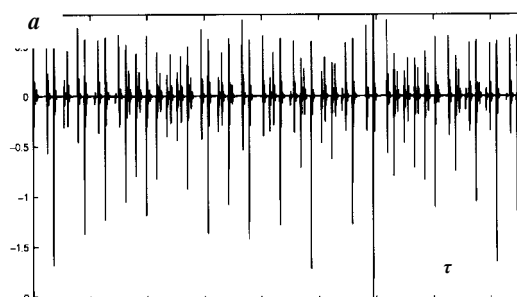
4. WYNIKI ANALIZY SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH

Badania przeprowadzono w celu sprawdzenia przydatności różnych metod analizy sygnałów drganiowych do wykrywania uszkodzeń kół zębatych, 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 jego odcinka przyporu.

Rejestrowano i analizowano chwilowe wartości przyspieszeń drgań skrętnych kół.



Rys. 2. Przyspieszenia drgań skrętnych kół (a) w przypadku pęknięcia zęba u podstawy, dla przypadku kół wykonanych bezbłędnie.



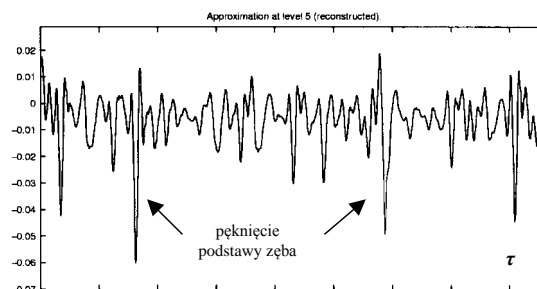
Rys. 3. Przyspieszenia drgań skrętnych kół (a) w przypadku pęknięcia zęba u podstawy dla kół z odchyłkami losowymi podziałki.

Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi przyspieszeń drgań skrętnych kół w przypadku pęknięcia zęba uzyskane dla przekładni wykonanej bezbłędnie. Kolejne odcinki przyporu uszkodzonych zębów są wyraźnie widoczne i powtarzają się w sposób regularny. Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi przyspieszeń drgań skrętnych kół dla tego samego przypadku uszkodzenia przy jednoczesnym występowaniu odchyłek losowych podziałki. W przypadku występowania tych odchyłek wykrycie i określenie momentu wystąpienia lokalnego uszkodzenia (pęknięcia zęba) jest bardzo trudne. Rysunek 4 przedstawia wyniki dekompozycji falkowej sygnału przyspieszeń drgań na poszczególne składowe. Do analizy zastosowano funkcję analizującą db4 z rodziny funkcji bazowych Daubechies [5].

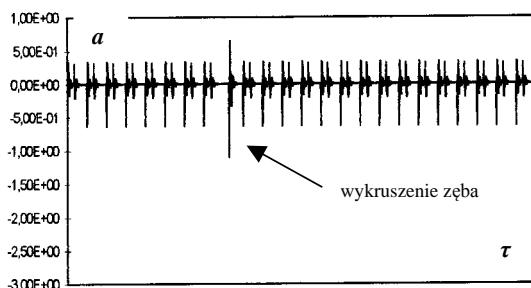
Zastosowanie analizy falkowej umożliwia wykrycie i lokalizację uszkodzenia w funkcji kąta obrotu koła (rys. 4).

Podobne wyniki otrzymano również w przypadku symulacji wykruszenia zęba. Na rysunku 5. przedstawiono przebiegi przyspieszeń drgań skrętnych kół z wykruszonym wierzchołkiem zęba uzyskane dla przekładni wykonanej bezbłędnie. Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi przyspieszeń drgań skrętnych kół dla tego samego przypadku uszkodzenia przy jednoczesnym występowaniu odchyłek losowych podziałki. Również w tym przypadku wykrycie i określenie momentu wystąpienia lokalnego uszkodzenia (wykruszenia zęba) jest bardzo trudne. Rysunek 7 przedstawia wyniki dekompozycji falkowej sygnału przyspieszeń drgań na poszczególne składowe. Jak widać zastosowanie analizy falkowej umożliwiło wykrycie i lokalizację uszkodzenia w funkcji kąta obrotu koła.

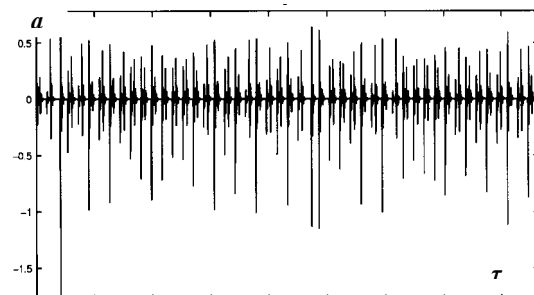
Analiza falkowa pozwala więc na wykrycie wystąpienia uszkodzenia kół w postaci pęknięcia lub wykruszenia zęba. Jednak na tym etapie badań stworzenie diagnostycznego modelu odwrotnego, a więc ustalenie rodzaju uszkodzenia na podstawie symptomów jest znacznie utrudnione.



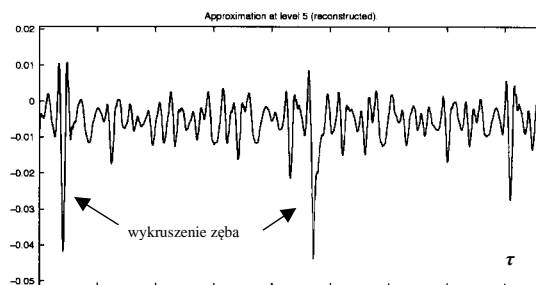
Rys.4. Wynik dekompozycji falkowej sygnału przyspieszenia drgań obwodowych kół w przypadku pęknięcia zęba przy jednoczesnym występowaniu odchyłek losowych podziałki.



Rys. 5. Przyspieszenia drgań skrętnych kół (a) w przypadku wykruszenia wierzchołka zęba dla kół bezbłędnych



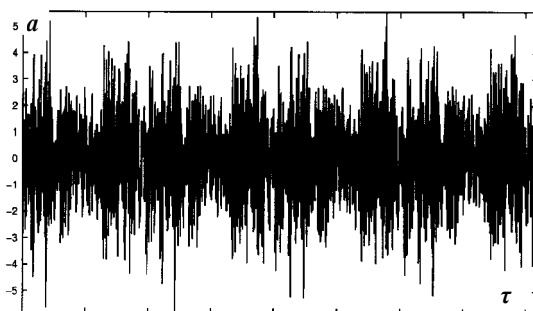
Rys. 6. Przyspieszenia drgań skrętnych kół (a) w przypadku wykruszenia wierzchołka zęba przy jednoczesnym występowaniu odchyłek losowych podziałki



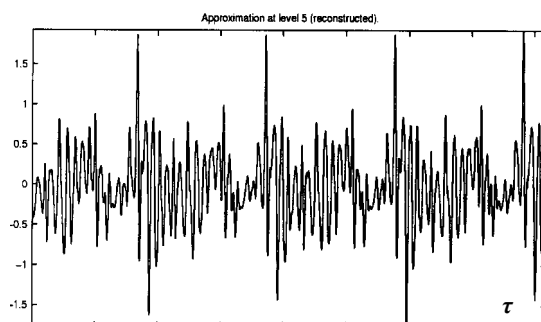
Rys. 7. Wynik dekompozycji falkowej sygnału przyspieszenia drgań obwodowych kół w przypadku wykruszenia wierzchołka zęba przy jednoczesnym występowaniu odchyłek losowych podziałki

Celem potwierdzenia wniosków wynikających z badań symulacyjnych przeprowadzono badania laboratoryjne na stanowisku mocy krążącej FZG [1]. Obiektem badań były koła o zębach prostych ($z_1 = 16$, $z_2 = 24$), w których wykonano celowe uszkodzenia, takie jak: pęknięcie u podstawy i wykruszenie wierzchołka zęba w różnych stadiach zaawansowania.

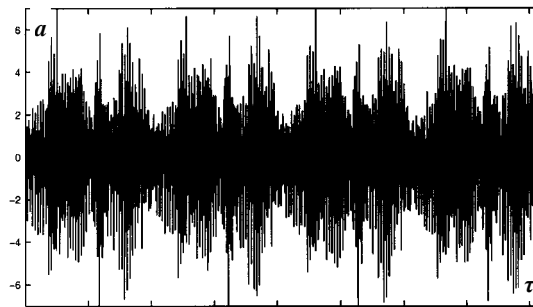
Na rysunku 8. przedstawiono przebieg czasowy przyspieszeń drgań skrętnych kół w przypadku pęknięcia zęba u podstawy, a na rysunku 9. wyniki analizy falkowej tego przebiegu. Kolejne rysunki 10. i 11. przedstawiają odpowiedni przebieg czasowy przyspieszeń drgań skrętnych kół w przypadku wykruszenia wierzchołka zęba oraz wyniki jego analizy falkowej.



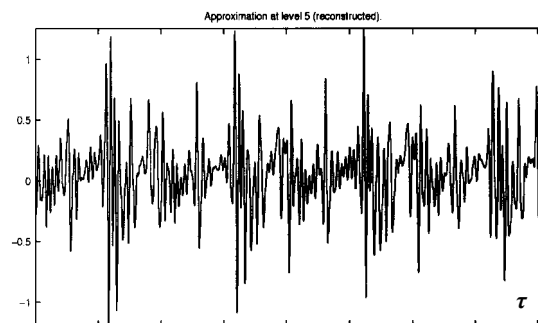
Rys. 8. Przyspieszenia drgań skrętnych kół (a) w przypadku pęknięcia zęba u podstawy



Rys. 9. Rezultaty analizy falkowej przyspieszeń drgań skrętnych kół w przypadku pęknięcia zęba u podstawy



Rys. 10. Przyspieszenia drgań skrętnych kół (a) w przypadku wykruszenia wierzchołka zęba

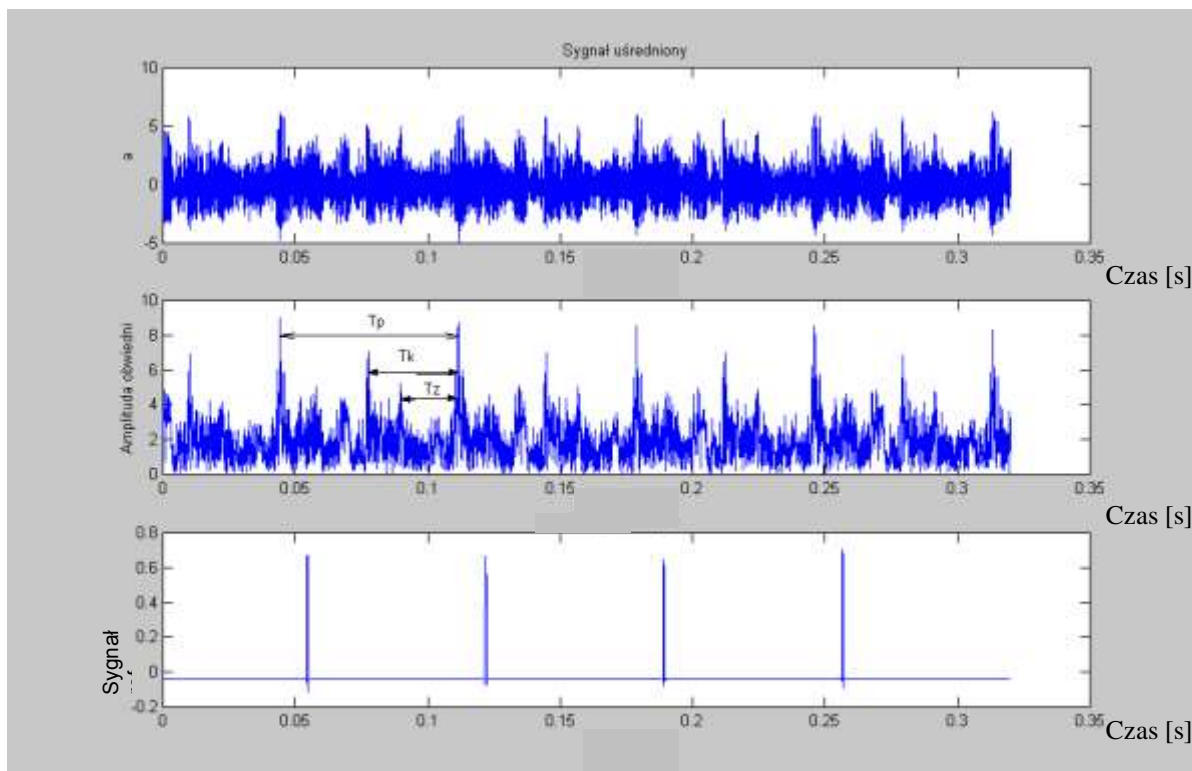


Rys. 11. Rezultaty analizy falkowej przyspieszenia drgań skrętnych kół w przypadku wykruszenia wierzchołka zęba

Uszkodzenia lokalne, takie jak pęknięcie lub wykruszenie zęba, wywołują impulsową modulację sygnału generowanego w zazębieniu nie powodując istotnego wzrostu ogólnego poziomu drgań.

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych i laboratoryjnych wynika, że analiza falkowa umożliwia wykrycie lokalnych uszkodzeń w obecności losowych błędów wykonania kół, nawet w przypadku sygnału nieuśrednionego synchronicznie.

Na rysunku 12. przedstawiono sygnał przyspieszeń drgań skrętnych z czujnika 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 .



Rys. 12. Uśredniony synchronicznie sygnał przyspieszeń drgań skrętnych, obwiednia sygnał i sygnał synchronizujący – czujnik umieszczony bezpośrednio na uszkodzonym kole.

Zastosowanie analizy czasowo-częstotliwościowej Wignera-Ville'a umożliwia wykrycie uszkodzenia lokalnego zarówno w przypadku sygnału uśrednionego, jak i nieuśrednionego. Na rysunku 13. 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 dyskryminant stosowanych w diagnostyce uszkodzeń przekładni zębatych.

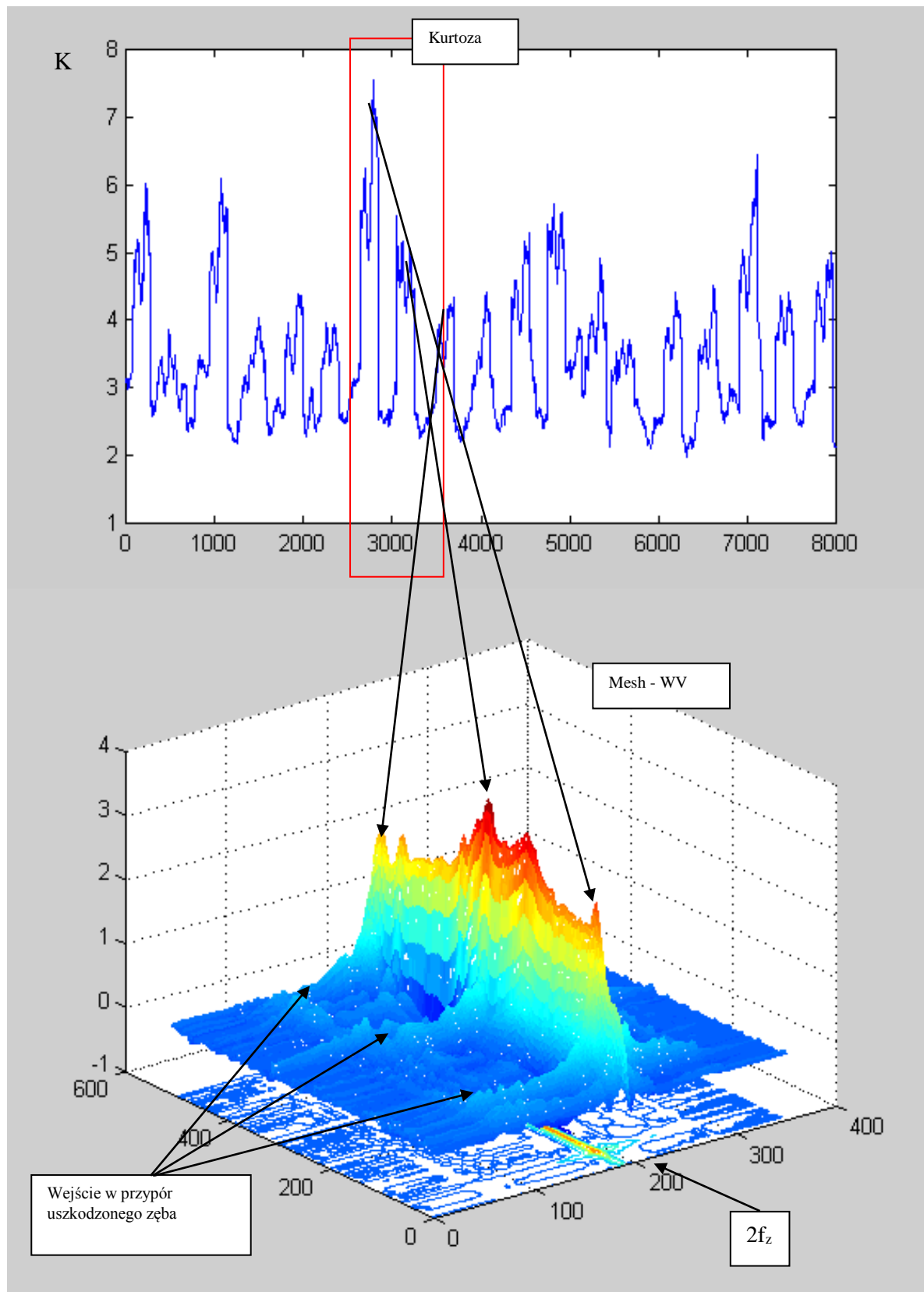
$$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{x_{RMS}^4}, \quad (5)$$

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 przesuwanym wzdłuż osi czasu są dobrym symptomem lokalnych uszkodzeń kół. W tym przypadku jako miarę diagnostyczną proponuje się zmodyfikowany współczynnik kurtozy opisany wzorem:

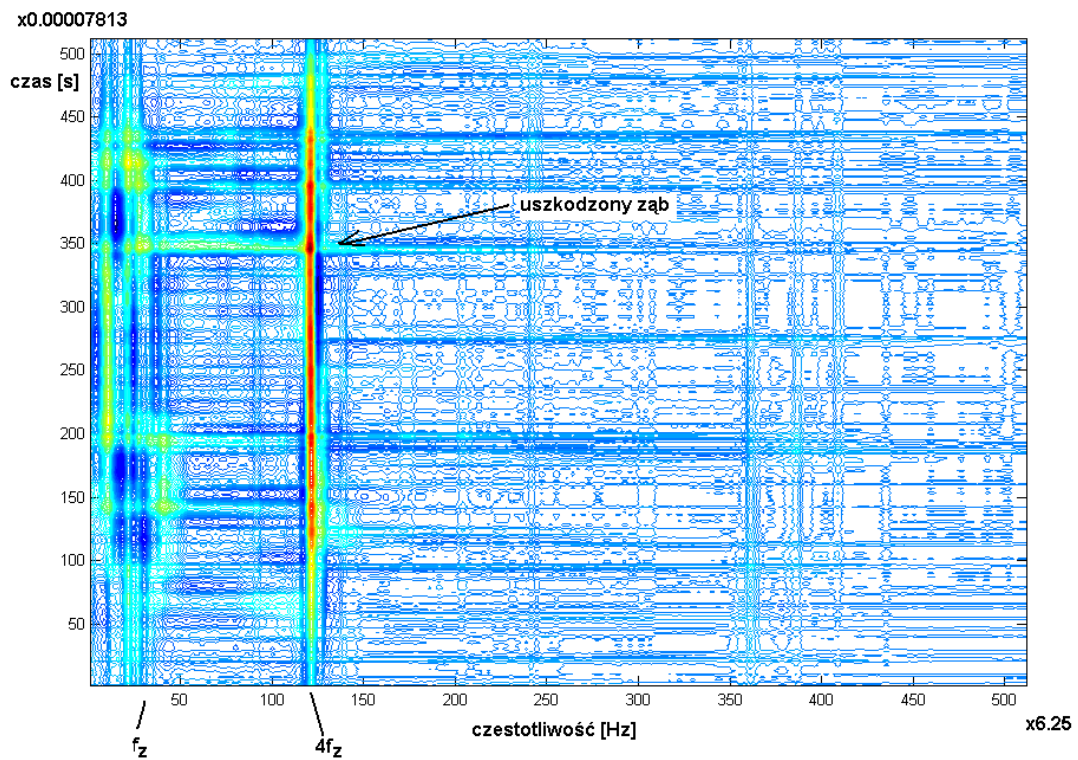
$$K_j = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=j}^{j+N-1} (x_i - \bar{x}_j)^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=j}^{j+N-1} (x_i - \bar{x}_j)^2 \right]^2}, \quad (6)$$

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

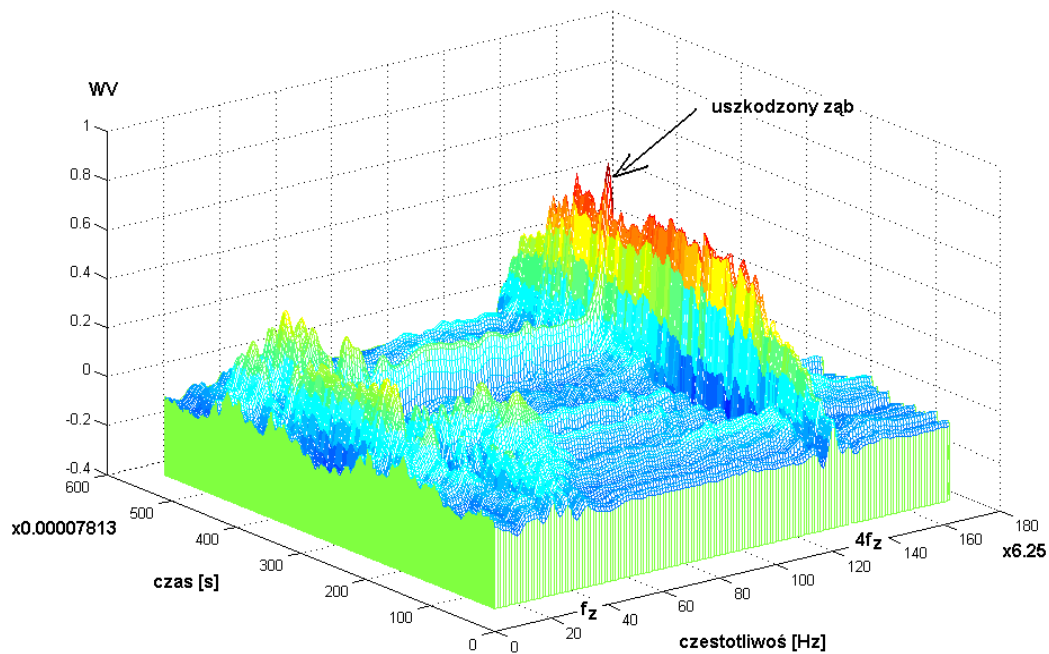
\bar{x}_j - wartość średnia sygnału w oknie czasowym o długości N próbek.



Rys. 13. Zmiany współczynnika kurtozy K_j w funkcji czasu i rozkład WV dla przekładni z wykruszonym zębem zębnika , obciążenie $M = 138$ Nm, prędkość obrotowa $n = 2700$ obr./min., czujnik umieszczony na korpusie łożyska koła, uśrednianie w okresie T_z .



Rys. 14. Wyniki czasowo-częstotliwościowego rozkładu WV uśrednionego synchronicznie sygnału przyspieszeń drgań (w przypadku pęknięcia zęba u podstawy)



Rys. 15. Przestrzenny czasowo-częstotliwościowy rozkład WV uśrednionego synchronicznie sygnału przyspieszeń drgań (w przypadku pęknięcia zęba u podstawy).

Na dwóch kolejnych rysunkach przedstawiono dwa sposoby prezentacji wyników analizy czasowo-częstotliwościowych WV. Na rysunku 14. przedstawiono dwuwymiarowy konturowy natomiast na rysunku 15. 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 13. w paśmie $2f_z$ strzałkami zaznaczono lokalne ekstrema rozkładu WV wywołane wejściem w przypór uszkodzonego zęba. Jak wynika z rysunków 14. i 15. 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 czasie obejmującym wejście w przypór kolejnych zębów (rys. 14.). 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.14, 15.) w postaci niesymetrycznie rozłożonych wstęp bocznych.

5. WNIOSKI

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

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

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. Z przeprowadzonych badań wynika, że celowe jest stosowanie analizy WV do diagnozowania lokalnych uszkodzeń łącznie z klasycznymi metodami analizy sygnałów, które ułatwiają poprawną interpretację wyników analizy WV.

6. 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.: Wavelt Analysis in Diagnosis of Selected Damages in Toothed Wheels. Machine Dynamic Problems, 1999, vol. 23, No 2, s. 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.

APPLICATION OF TIME-FREQUENCY ANALYSIS IN DIAGNOSTICS OF LOCAL DAMAGES OF THE TOOTHED GEAR

Abstract: The paper presents results of simulations and experimental tests. Experimental data was obtained from a FZG stand. Simulating tests based on the two-dimensional model of pair of spur gears. The model enables the simulation of tooth cracking by the changes of its stiffness and also the tooth chipping by shortening its contact length. Local damages as tooth breaking/cracking or chipping send the impulse modulation of a signal generated while in contact. It does not cause any significant rise in the general level of vibrations. Different methods of signal analysis, which allow one to obtain full time – frequency structure of a signal, are used for gear diagnosis. The conducted simulating and experimental tests show that both methods (WT, WV) allow detecting local damages with wheel random deviations.

Recenzent: dr inż. Jacek SPAŁEK