

## DIAGNOZOWANIE ZŁOŻONYCH PRZYPADKÓW USZKODZEŃ PRZEKŁADNI ZĘBATYCH W EKSPERYMENCIE CZYNNYM

Tomasz FIGLUS, Andrzej WILK

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

### Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę diagnozowania sygnału drganiowego emitowanego przez przekładnię zębatą, w której podczas eksperymentu czynnego symulowano równoczesne uszkodzenie koła zębatego oraz łożysk tocznych.

W badaniach wykorzystano technikę laserowego pomiaru prędkości drgań wału. Zmierzone sygnały analizowano wykorzystując filtrację grzebieniową widma oraz transformatę Wignera-Ville'a, poszukując symptomów uszkodzeń przekładni.

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

### DIAGNOSIS OF COMPLEX CASES GEAR TRANSMISSION DAMAGE DURING THE ACTIVE EXPERIMENT

#### Summary

In the 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 comb filtration and Wigner-Ville's analysis, and was searched a local damage of tooth gear.

Keywords: diagnostics, tooth gear damage, rolling bearing damage.

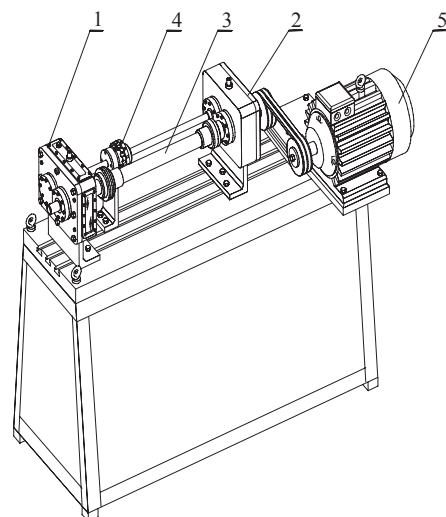
## 1. WSTĘP

Przedstawione w wielu publikacjach badania diagnostyczne przekładni zębatych [1-5] obejmowały swym zakresem osobną identyfikację lokalnych uszkodzeń kół zębatych oraz uszkodzeń łożysk tocznych. Wykrywanie tych uszkodzeń występujących jednocześnie, ze względu na złożoność problemu diagnozowania, nie zostało jeszcze rozwiązane.

W pracy przedstawiono analizę wyników pomiarów przekładni, w której na wale zamontowano uszkodzone łożysko toczne oraz koło zębate. Analizę przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie zastosowano transformatę Wignera-Ville'a (WV), tak jak przy wykrywaniu uszkodzeń jednostkowych, a w drugim transformata (WV) poprzedzona została filtracją grzebieniową.

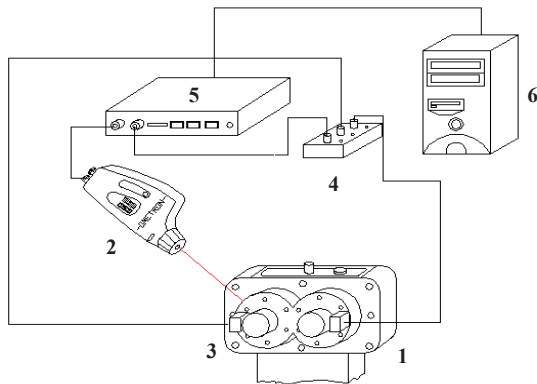
## 2. METODA POMIARÓW

Badania przeprowadzono na stanowisku mocy krążącej FZG (rys.1) 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:  
1-badana przekładnia, 2-przekładnia zamykająca, 3-wał skrotny, 4-sprzęgło napinające, 5-silnik napędzający

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

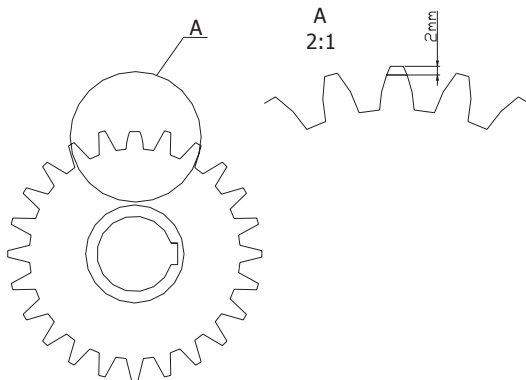


Rys. 2. Schemat układu pomiarowego:  
 1-badana przekładnia, 2-wibrometr laserowy,  
 3-czujniki położenia wałów, 4-układ logiczny, 5-analizator sygnałów DSPT SigLab, 6-komputer PC

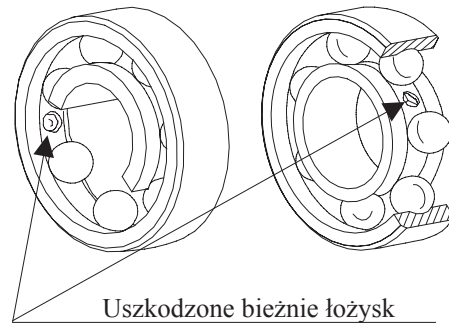
W badaniach założono uszkodzenie koła zębatego w postaci wykruszenia jednego zęba (rys.3.1) oraz dwóch różnych uszkodzeń łożysk tocznych – bieżni wewnętrznej i zewnętrznej (rys.3.2). Uszkodzone elementy pracowały na tym samym wale przekładni zębatej.

Koła zębate wykorzystane w badaniach miały następujące parametry: liczba zębów zębniaka 16, liczba zębów koła 24, moduł 4,5 mm, szerokość ząbienia 20 mm, współczynnik przesunięcia zarysu zębniaka  $x_1=0,864$ , współczynnik przesunięcia zarysu koła  $x_2=-0,5$ , odległość osi kół 91,5 mm.

Zadane uszkodzenie w postaci zmniejszenia wysokości głowy zęba o 2 mm (wykruszenia zęba) odpowiadało wskaźnikowi przyporu czołowego  $\varepsilon_{\alpha}=0,93$ . Częstotliwość pojawiania się tego uszkodzenia w sygnale WA wynosiła zależnie od prędkości obrotowej  $f_{o2}=15$  oraz 30 Hz.



Rys.3.1. Wykruszenie zęba koła



Rys.3.2. Uszkodzenia bieżni łożysk

W badaniach wykorzystano łożyska kulkowe zwykle 6307, w których bieżnie wewnętrzne i zewnętrzne zostały uszkodzone w jednym miejscu na obwodzie. Charakterystyczne częstotliwości pojawiania się tych uszkodzeń w sygnale obliczone z zależności (1) i (2) przedstawiono w tabeli 1.

- uszkodzenie pierścienia wewnętrznego

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

- uszkodzenie pierścienia zewnętrznego

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

gdzie:

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

Tabela 1. Częstotliwości charakterystyczne dla badanych uszkodzeń łożysk tocznych

Częstotliwość obrotu koła	$f_{o2}$ [Hz]	15	30
Częstotliwość pojawiania się uszkodzenia pierścienia wewnętrznego łożyska	$f_{\text{wewn}}$ [Hz]	65	130,1
Częstotliwość pojawiania się uszkodzenia pierścienia zewnętrznego łożyska	$f_{\text{zewn}}$ [Hz]	45	90,1

### 3. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

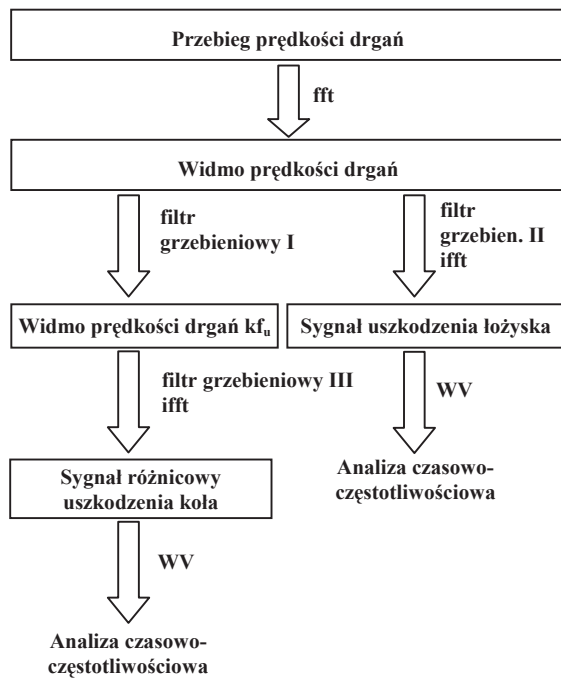
Do analizy wyników pomiarów wykorzystano transformatę Wignera-Ville'a, opisaną zależnością (3):

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

gdzie:

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

Jak wynika, z przedstawionych poniżej analiz transformata ta, zastosowana do obliczeń złożonego sygnału drganiowego nie pozwalała odróżnić występujących uszkodzeń elementów przekładni. Dlatego też, do dalszych obliczeń zaproponowano metodę, której algorytm przedstawiono na rys.4.

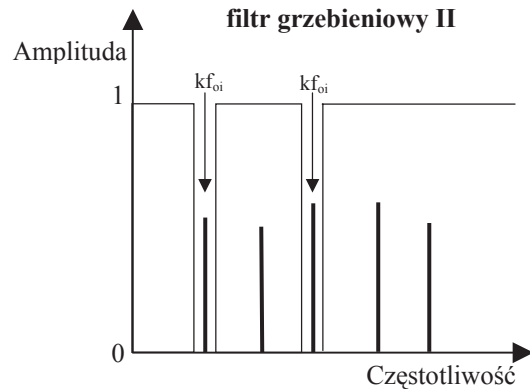
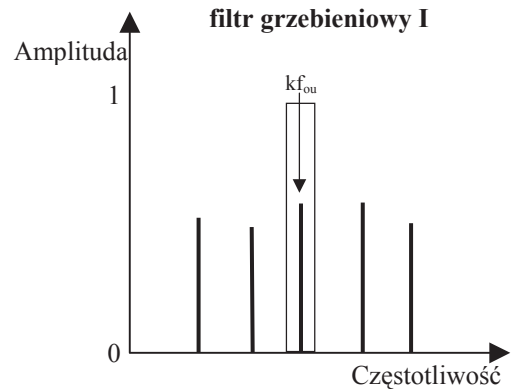


Rys.4. Analiza sygnału zorientowana na wykrywanie uszkodzenia koła zębatego i łożyska tocznego

W metodzie tej sygnał poddaje się filtracji grzebieniowej o różnej charakterystyce filtrów (rys.5 i 6) – zorientowanej na określony typ uszkodzenia.

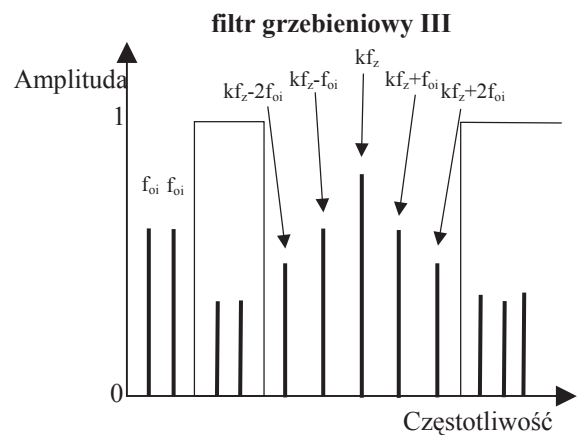
Sygnał różnicowy otrzymuje się przez usunięcie w widmie pasm zawierających: harmoniczne częstotliwości zazębienia, częstotliwości je modulujące (wstęgi boczne) oraz częstotliwości obrotowe kół.

Następnie otrzymane sygnały analizuje się przy zastosowaniu odpowiednich miar sygnału wibroakustycznego, między innymi transformaty WV.



Rys.5 Realizacja filtra grzebieniowego nr I i II:

- linią ciągłą oznaczono pasmo przenoszenia filtrów
- $f_{ou}$  – częstotliwość pojawiania się uszkodzenia koła zębatego,
- $f_{oi}$  – częstotliwości obrotowe kół,
- $k$  – harmoniczna 1,2,3,...



Rys.6. Realizacja filtra grzebieniowego nr III:

- linią ciągłą oznaczono pasmo przenoszenia odpowiadające filtracji sygnału różnicowego
- $f_{oi}$  – częstotliwości obrotowe kół,
- $k$  – harmoniczna 1,2,3,...

Na rysunkach 7-12 przedstawiono rozkłady Wignera-Ville'a sygnałów prędkości drgań wału (pomiaru przy  $f_{02} = 30\text{Hz}$  i  $Q = 3,85\text{MPa}$ ) w przypadku następującej kombinacji uszkodzeń:

- koła zębatego i pierścienia wewnętrznego łożyska – KW,
- koła zębatego i pierścienia zewnętrznego łożyska – KZ.

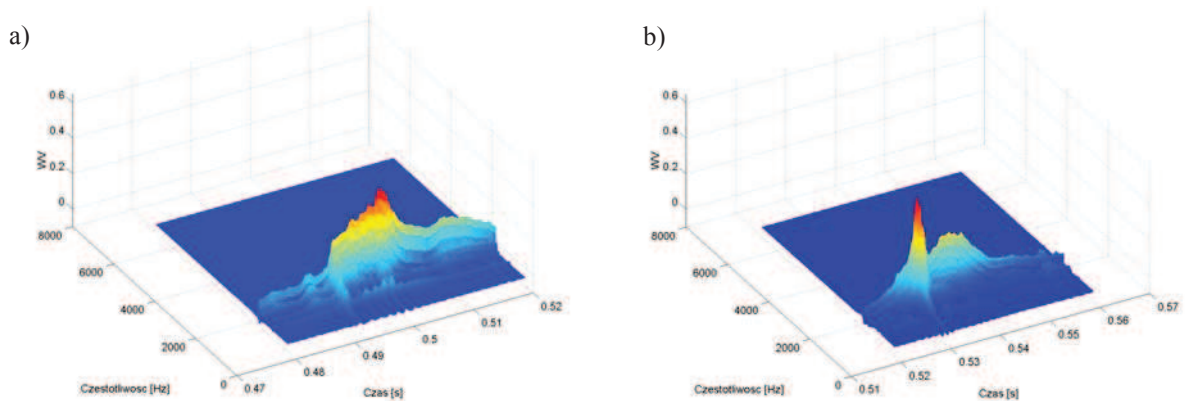
Wyniki transformacji Wignera-Ville'a przedstawione na rysunku 7 (KW) oraz 10 (KZ) dotyczą sygnałów drganiowych, które nie poddano uprzedniej obróbce z wykorzystaniem filtracji grzebieniowej. Analizy wykonane w dwóch następujących bezpośrednio po sobie chwilach czasu wykazały lokalne wzrosty amplitudy sygnałów (w skali WV). Identyfikacja ich lub powiązanie z częstotliwościami występowania uszkodzeń przekładni jest niemożliwe.

Kolejne analizy wykonano stosując metodę przedstawioną na rys.4. Zaprezentowane na rysunkach 9 oraz 10 transformaty WV sygnału różnicowego uszkodzonego koła zębatego oraz pierścienia wewnętrznego łożyska tocznego (KW) wskazują na znaczne wzrosty amplitud sygnałów drganiowych. W każdym przypadku wejście w przypór wykruszonego zęba powoduje

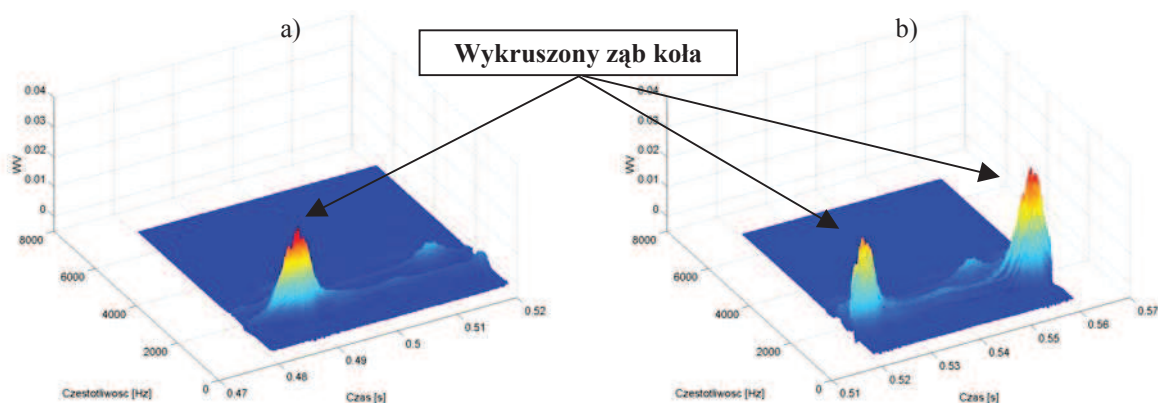
zwiększenie amplitudy sygnału powtarzające się z częstotliwością obrotu koła. W przypadku uszkodzenia pierścienia wewnętrznego amplituda przyjmuje różne wartości. Przyczyną tego jest zmiana położenia kontaktu kulek z miejscowym uszkodzeniem bieżni w stosunku do kierunku realizacji pomiaru.

Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono analizy sygnału różnicowego uszkodzonego koła zębatego oraz pierścienia zewnętrznego łożyska (KZ). Wartość amplitudy sygnału uszkodzonego koła jest zbliżona do wartości występującej w poprzednim przypadku, a charakterystyki częstotliwościowe sygnałów w obu przypadkach są podobne. Kontakt kulek z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej powoduje stały wzrost amplitudy sygnału, powtarzający się z częstotliwością występującego uszkodzenia. Jego wartość zmienia się jednak nieznacznie, co związane może być ze zmianą stanu dynamicznego przekładni zębatej.

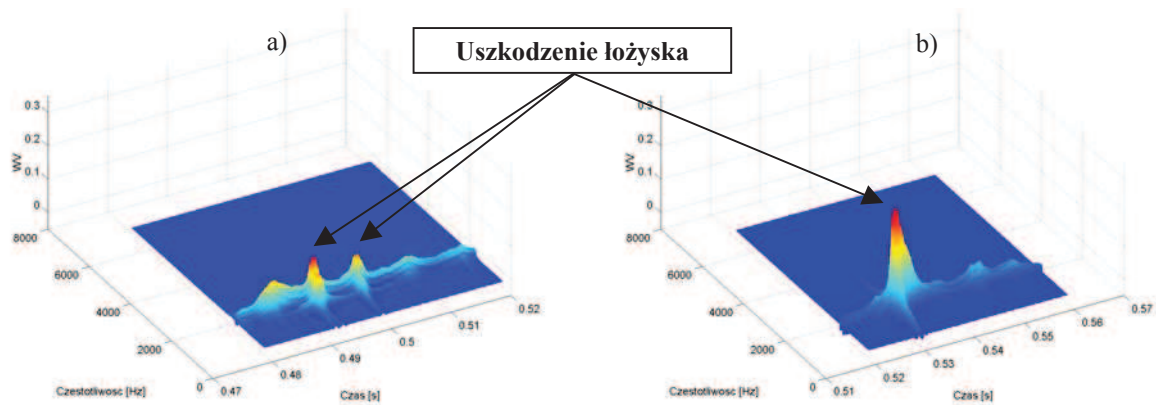
Tak więc, zaproponowana metoda dwustopniowej filtracji grzebieniowej oraz analiza Wignera-Ville'a otrzymanego sygnału pozwala na jednoznaczne wykrycie występującego wykruszenia zęba koła oraz uszkodzenia łożyska tocznego.



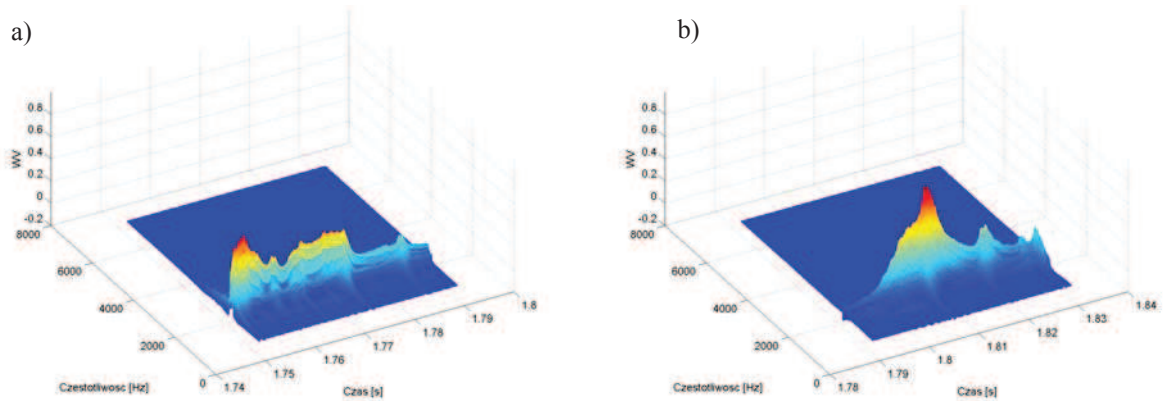
Rys.7 Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań sygnału - wykruszony ząb-uszkodzony pierścień wewnętrzny łożyska (KW), dla: a)  $t=0,479-0,518$  [s], b)  $t=0,519-0,558$  [s]



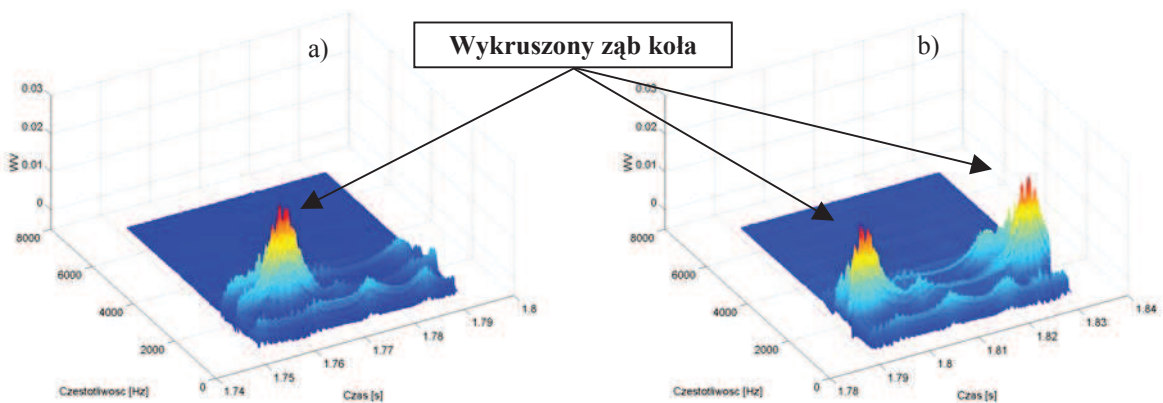
Rys.8 Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań (KW po filtracji grzebieniowej I i III) sygnału różnicowego uszkodzonego koła, dla: a)  $t=0,479-0,518$  [s], b)  $t=0,519-0,558$  [s]



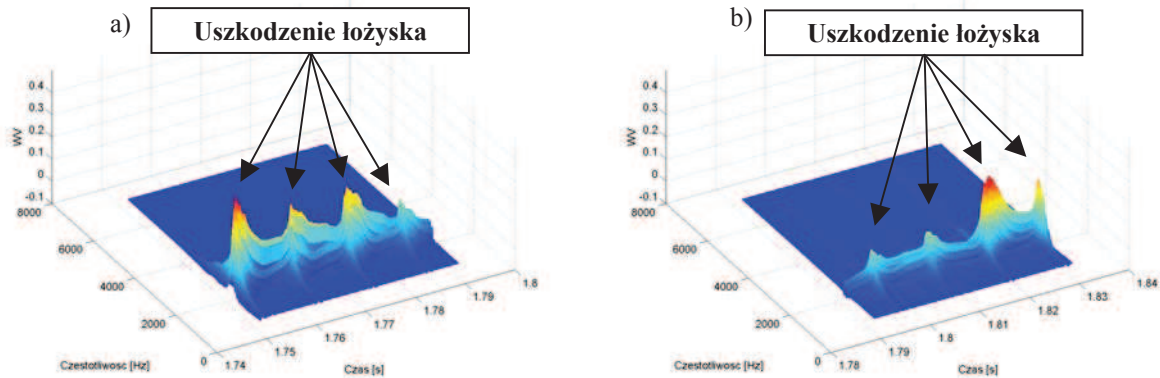
Rys.9 Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań (KW po filtracji grzebieniowej II) sygnału uszkodzonego pierścienia wewnętrznego łożyska, dla: a)  $t=0,479-0,518$  [s], b)  $t=0,519-0,558$  [s]



Rys.10 Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań sygnału - wykuszony ząb-uszkodzony pierścień zewnętrzny łożyska (KZ), dla: a)  $t=1,749-1,788$  [s], b)  $t=1,789-1,828$  [s]



Rys.11 Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań (KZ po filtracji grzebieniowej I i III) sygnału różnicowego uszkodzonego koła, dla: a)  $t=1,749-1,788$  [s], b)  $t=1,789-1,828$  [s]



Rys.12. Czasowo-częstotliwościowa transformata WV prędkości drgań (KZ po filtracji grzebieniowej II) sygnału uszkodzonego pierścienia zewnętrznego łożyska, dla: a)  $t=1,749-1,788$  [s], b)  $t=1,789-1,828$  [s]

#### 4. WNIOSKI

Metody analiz sygnałów wykorzystywane w diagnozowaniu stanu kół zębatych (rys.7 i 10) są niewystarczające przy wykrywaniu złożonych uszkodzeń przekładni zębatej.

W pracy zaproponowano metodę analizy sygnałów zorientowaną na wykrywanie występujących jednocześnie uszkodzeń kół zębatych i łożysk tocznych (rys.4). Wykorzystana w niej filtracja grzebieniowa umożliwiła separowanie częstotliwości związanych z występującymi uszkodzeniami, a zastosowana transformata Wignera-Ville'a – analizę otrzymanego sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości.

Obecnie prowadzone są dalsze badania nad wykorzystaniem przedstawionej w pracy metody.

#### LITERATURA:

- [1] Łazarz B., Wojnar G.: Diagnostowanie lokalnych uszkodzeń łożysk tocznych w przekładni zębatej. Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2003
- [2] Wilk A. Łazarz B. Madej H.: Diagnostyka wibroakustyczna przekładni zębatych, Konferencja DIAG'2003
- [3] 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
- [6] 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



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.