

WPLYW TRANSMITANCJI DRGAŃ NA SYMPTOMY DIAGNOSTYCZNE STANU KÓŁ ZĘBATYCH

Tomasz FIGLUS, Andrzej WILK

Politechnika Śląska, Katedra Budowy Pojazdów Samochodowych
40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8, tel. 032 603 41 18,
tomasz.figlus@polsl.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono wykorzystanie eksperymentalnej analizy modalnej do oceny wpływu transmitancji drgań na symptomy diagnostyczne stanu kół zębatach. Badania prowadzono na stanowisku mocy krążącej FZG. Stosując młotek modalny wymuszano drgania kół, wałów i obudowy przekładni jednostkowym impulsem siły. Na podstawie badań otrzymano charakterystyki transmitancji wzajemnej oraz własnej wybranych punktów pomiarowych wałów i obudowy przekładni. Wyniki badań porównano z rozkładami czasowo-częstotliwościowymi sygnałów drganiowych przekładni, które towarzyszą zużyciu powierzchni roboczej zębów i wykruszeniu zęba koła.

Słowa kluczowe: analiza modalna, diagnostyka uszkodzeń przekładni zębatach.

THE INFLUENCE OF VIBRATION TRANSMITTANCE ON DIAGNOSTICS SYMPTOMS OF TOOTH GEAR CONDITION

Summary

The paper presents the use of experimental modal analysis in estimation of influence of vibration transmittance on diagnostics symptoms of tooth gear condition. The research was realized on power circulating gear testing machine FZG. Modal hammer was used to enforce gearbox elements vibration. On the basis of the analysis characteristics of transmittance in different points of gearbox were received. The results of the experiment were compared to Wigner-Ville distribution of vibration signal, accompanying tooth surface and tooth local damages

Keywords: modal analysis, diagnostics tooth gear damage.

1. WPROWADZENIE

W prowadzonych do tej pory badaniach diagnostycznych przekładni zębatach wykorzystywano do pomiarów zarówno przetworniki piezoelektryczne, jak i znacznie nowocześniejsze wibrometry laserowe [1-7]. Zastosowanie tych drugich znacznie rozszerzyło zakres prowadzonych badań o możliwości pomiarów bezkontaktowych drgań wirujących wałów [1,4-7], bez konieczności montażu na przekładni dodatkowych urządzeń. Dzięki znacznemu rozwojowi techniki komputerowej w ostatnich latach znacznie rozwinął się zakres czynności związany z przetwarzaniem i analizą sygnałów. Rozwój ten wpłynął na opracowanie wielu metod diagnozowania tzw. prostych przypadków uszkodzeń przekładni, w których zakłada się, że tylko jeden element przekładni jest uszkodzony [1-3], ale również tzw. złożonych przypadków uszkodzeń, gdy w przekładni występują równocześnie uszkodzenia kół zębatach i łożysk tocznych [4-7].

W pracy omówiono wybrane badania złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatach oraz

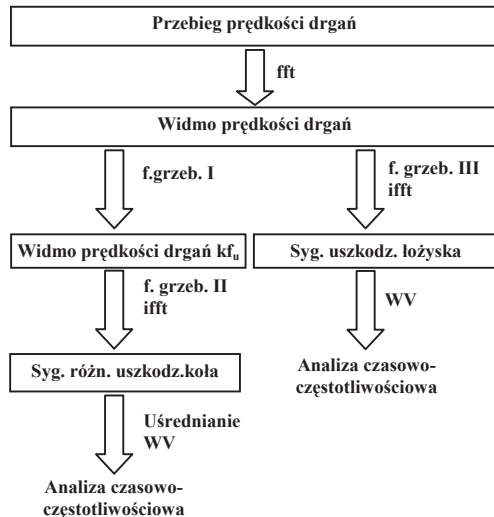
przedstawiono wpływ transmitancji drgań na symptomy drganiowe stanu kół zębatach.

2. DIAGNOZOWANIE ZŁOŻONYCH PRZYPADKÓW USZKODZEŃ PRZEKŁADNI

Na podstawie przeprowadzonych dotychczas przez Autorów badań i analiz wynika, że zastosowanie metod stosowanych do diagnozowania prostych uszkodzeń przekładni zębatach może być niewystarczające przy złożonych przypadkach ich uszkodzeń. Powodem tych utrudnień są znaczące różnice energetyczne symptomów uszkodzeń kół i innych elementów przekładni. Jak pokazano w [4] uszkodzenia kół zębatach emitują składowe drgań o małej amplitudzie (sygnały niskoenergetyczne), podczas, gdy np. zużyte lub uszkodzone łożyska toczne emitować mogą drgania o znacznie większej amplitudzie (sygnały wysokoenergetyczne). Autorzy opracowali, więc własną metodę przetwarzania i analizy sygnałów drganiowych, którą wykorzystali do diagnozowania złożonych przypadków uszkodzeń przekładni (rys. 1). Metoda ta zaprezentowana w pracach [4,6,7] wykorzystuje

filtrację grzebieniową o różnej charakterystyce filtrów oraz uśrednianie synchroniczne sygnałów.

W zależności od celu analizy filtry przenosić mogą składowe widma zawierające informacje o stanie kół zębatach (f.grzeb. I i II), oraz o stanie łożysk tocznych (f. grzeb. III).



Rys.1. Analiza sygnału drganiowego zorientowana na wykrywanie uszkodzenia i zużycia koła zębatego oraz uszkodzenia łożyska tocznego

Jak pokazano w [4] zastosowanie tej metody (rys.1) umożliwiło wykrycie na podstawie analizy drgań wału przekładni, występującego wykruszenia zęba koła oraz uszkodzeń bieżni łożysk.

Bardzo ważnym zagadnieniem diagnozowania stanu przekładni zębatach jest wykrywanie wczesnych stadiów uszkodzeń. W uprzednio prowadzonych pracach [5,7], zajmowano się wykrywaniem różnych wartości wykruszenia zęba i zużycia powierzchni roboczej zębów w obecności uszkodzeń łożysk tocznych. Analizy wykonano stosując rozkłady czasowo-częstotliwościowe Wignera-Ville'a (WV) sygnałów przyspieszeń drgań obudowy oraz prędkości drgań poprzecznych wału przekładni. Na ich podstawie stwierdzić można, że w rozkładach tych występują zmiany amplitudy, które są symptomami wczesnych stadiów wykruszenia zęba i zużycia powierzchni roboczej zębów, niezależnie od stanu łożyskowania. Ilościowe zmiany tych amplitud przedstawiono za pomocą miar wstępnie przetworzonych sygnałów drganiowych przekładni, SWV oraz MwWV, które zdefiniowano w tych pracach.

Jak wynika z prowadzonych dotychczas badań (m.in. [4 - 7]) prawidłowa analiza rozkładów czasowo-częstotliwościowych WV sygnałów jest znacznie utrudniona, gdy pomiary drgań wykonuje się w różnych punktach przekładni. Wyselekcjonowane symptomy uszkodzenia, czy też zużycia kół, występować mogą w różnych zakresach częstotliwości sygnału drganiowego.

Pomocne, w rozwiązaniu tego problemu, okazały się badania struktury rezonansowej

i transmitancji wzajemnej oraz własnej drgań elementów badanej przekładni.

W dalszej części pracy poszukiwano odpowiedzi drganiowej poszczególnych elementów przekładni na wymuszenie impulsem siły do niej przyłożonej. Uzyskane wyniki porównano z rozkładami czasowo-częstotliwościowymi sygnału drganiowego generowanego przez przekładnię zębatą, w której występowały różne rodzaje uszkodzeń ząbienia.

3. EKSPERYMENTALNA ANALIZA MODALNA

Eksperymentalna analiza modalna jest często stosowaną w praktyce techniką badania własności dynamicznych obiektów mechanicznych, zarówno przy konstruowaniu, jak i eksploatacji maszyn [8,9].

Identyfikacja za pomocą eksperymentalnej analizy modalnej polega na wymuszeniu drgań obiektu przy jednoczesnym pomiarze siły wymuszającej i odpowiedzi układu. Rejestrując widma wymuszenia i odpowiedzi dokonuje się identyfikacji charakterystyk częstotliwościowych obiektu w postaci [10,11]:

- gęstości widmowej mocy,
- gęstości mocy wzajemnej,
- funkcji transmitancji.

Badania z wykorzystaniem eksperymentalnej analizy modalnej przedstawiono w publikacjach [8-11], gdzie przeprowadzono identyfikację częstotliwościową różnych struktur mechanicznych.

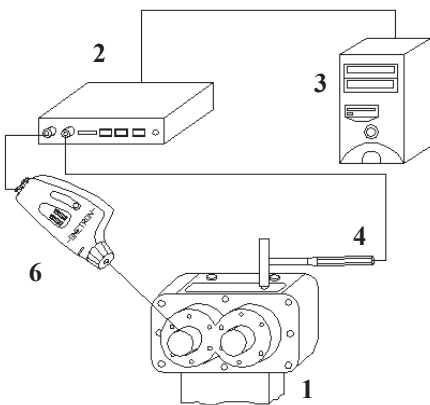
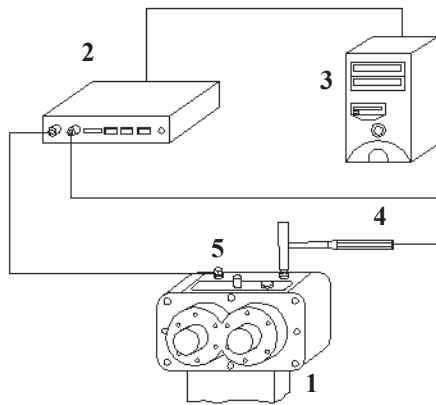
4. BADANIA STANOWISKOWE

Obiektem badanym była przekładnia stanowiska mocy krążącej FZG [1,4-9]. Pomiary przeprowadzono przetwornikiem piezoelektrycznym mierząc przyspieszenia w różnych punktach obudowy (5, rys.2) oraz wibrometrem laserowym mierząc prędkość drgań poprzecznych wałów przekładni (6, rys.2). Do wymuszenia impulsu siły stosowano młotek modalny wyposażony w czujnik siły z końcówką o dużej sztywności.

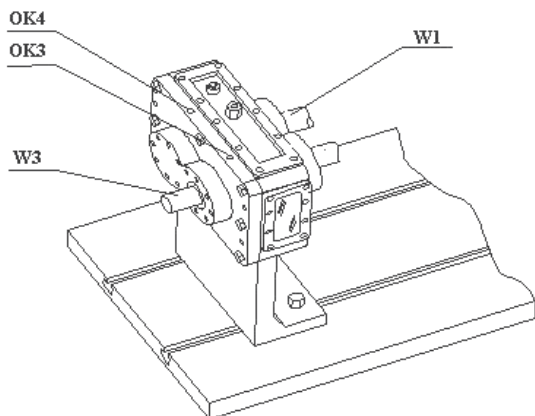
Sygnały napięciowe siły wymuszającej (4, rys.2) oraz przyspieszeń (5, rys.2) i prędkości drgań (6, rys.2) rejestrowano w dwukanałowym analizatorze sygnałów SigLab (2, rys.2), a następnie zapisywano w pamięci komputera PC (3, rys.2). Do analiz wykorzystano oprogramowanie VIOMA [10,11] pracujące w środowisku Matlab.

Eksperyment realizowano przy obciążeniu jednostkowym kół wynoszącym $Q=3,85$ MPa, które zadano na stanowisku za pomocą sprzęgła napinającego.

Na rysunku 3 przedstawiono wybrane punkty wałów i obudowy przekładni, w których przeprowadzono pomiary drgań. Wymuszenie impulsowe przykładano w punktach przedstawionych na rysunku 3 oraz dodatkowo na zębniku i kole przekładni badanej.



Rys.2. Schematy układów pomiarowych:
1 – badana przekładnia, 2 – analizator sygnałów DSPT SigLab, 3 – komputer PC, 4 – młotek modalny, 5 – przetwornik piezoelektryczny, 6 – wibrometr laserowy



Rys.3. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na obudowie i wałach przekładni zębatej

5. WYNIKI ANALIZY SYGNAŁÓW DRGANIOWYCH

Obliczenia funkcji transmitancji drgań pomiędzy dwoma sygnałami dyskretnymi $x(n)$ i $y(n)$ wykonano na podstawie zależności [12]:

$$\hat{H}(\omega) = \frac{\hat{P}_{xy}(\omega)}{\hat{P}_{xx}(\omega)} \quad (1)$$

gdzie:

$\hat{P}_{xy}(\omega)$ - gęstość widmowa mocy wzajemnej sygnałów $x(n)$ i $y(n)$,

$\hat{P}_{xx}(\omega)$ - gęstość widmowa mocy sygnału $x(n)$.

Na rysunkach 4-6 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń transmitancji wzajemnej i własnej drgań wybranych punktów pomiarowych, określonych podczas badań.



Rys.4. Transmitancja dla założeń: wymuszenie W1 - pomiar W1

Zaprezentowaną na rysunku 4 transmitancję własną otrzymano w przypadku pomiarów drgań wału 1 wibrometrem laserowym, gdy wymuszenie przyłożono do tego wału. Transmitancję drgań wału 1 charakteryzuje występujący rezonans w pasmach częstotliwości ok. 0,6 kHz, 1 kHz oraz 1,3 kHz.



Rys.5. Transmitancja dla założeń: wymuszenie OK3 - pomiar OK4

Transmitancję wzajemną pomiędzy punktami obudowy przekładni OK3 i OK4 przedstawiono na rysunku 5. Analizując tą zależność stwierdzić można, że zakresy częstotliwości rezonansowych tego punktu wynoszą około 1,8 i 4,2 kHz.

Wykonano również badania transmitancji własnej i wzajemnej drgań wału W3 przekładni (rys.6). Z otrzymanych funkcji transmitancji wynika, że wał ten posiada rezonans w zakresie częstotliwości około 1,2kHz, 1,4kHz i 1,9kHz.



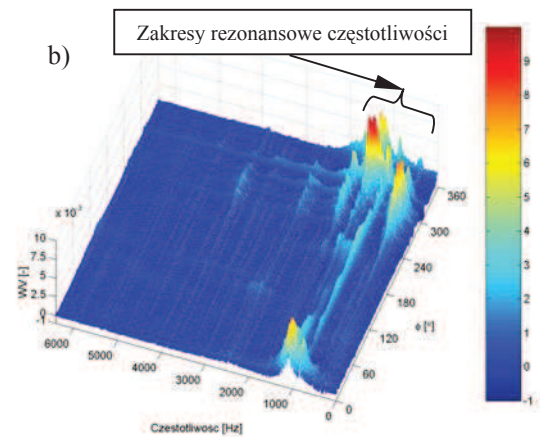
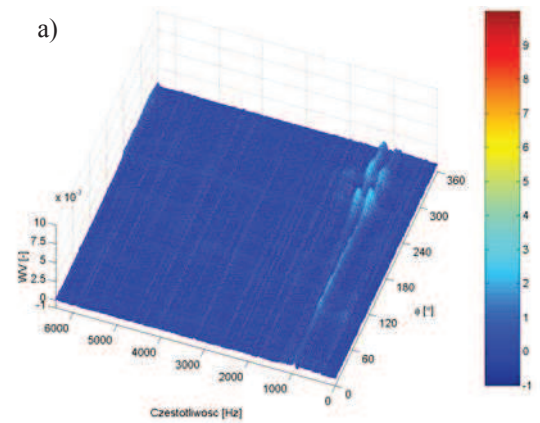
Rys.6. Transmitancja dla założeń:
wymuszenie W3 - pomiar W3

Jak wynika z przedstawionych na rysunkach 4-6 funkcji transmitancji drgań, każdy punkt pomiarowy posiada inne zakresy rezonansowe częstotliwości.

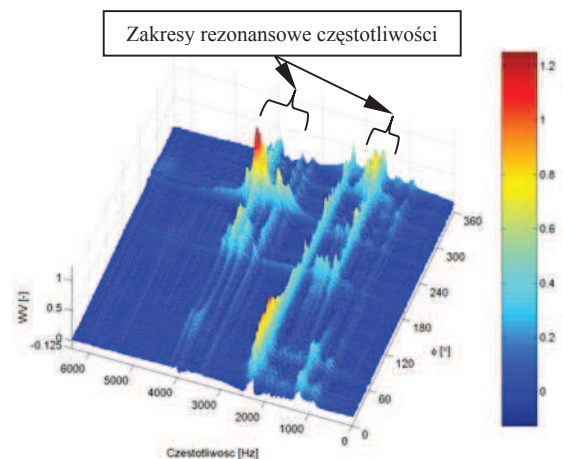
Funkcje transmitancji drgań porównano z wynikami badań prowadzonymi przez autorów i przedstawionymi m.in. w pracach [5,7], w których diagnozowano stan zazębienia w złożonych przypadkach uszkodzeń przekładni (rys.7-10). Rozkłady czasowo-częstotliwościowe Wignera-Ville'a wykonano analizując sygnały prędkości drgań poprzecznych wału (W1 i W3) i przyspieszeń drgań obudowy przekładni (OK4). Sygnały te poddano uprzednio wstępnemu przetwarzaniu, tj. filtracji i uśrednianiu, zgodnie z rys.1 zamieszczonym w p. 2.

Na rysunkach 7-8 zamieszczono rozkłady WV sygnałów drganiowych, których celem było wykrycie zużycia powierzchni roboczej zębów. Na rysunku 7a zaprezentowano przetworzony sygnał drganiowy wału przekładni bez zużycia powierzchni roboczej zębów kół. W rozkładzie tym nie obserwuje się chwilowych przyrostów amplitudy.

W pozostałych przypadkach pomiarów prezentowanych w pracy, rejestrowano również sygnały odniesienia, nieuszkodzonego zazębienia. Podobnie jak na rysunku 7a nie występowały w nich chwilowe zmiany amplitudy rozkładów WV.



Rys.7. Rozkłady WV sygnału drganiowego wału przekładni:
a) bez zużycia, b) zużyte powierzchni robocze zębów kół



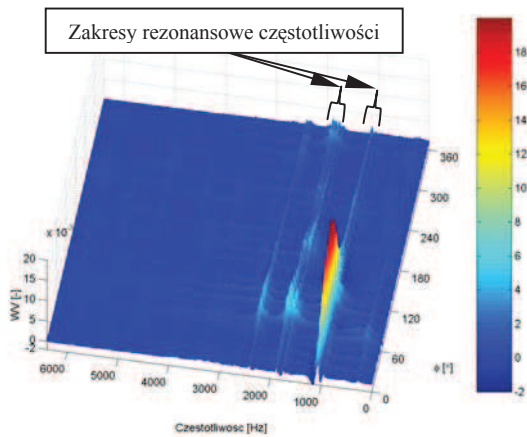
Rys.8. Rozkłady WV wyznaczone w przypadkach zużytych powierzchni roboczych zębów kół - pomiar drgań obudowy przekładni

Obserwowany na rysunkach 7b i 8 wzrost maksymalnej amplitudy drgań wału, jak i obudowy przekładni, który towarzyszy zużyciu powierzchni roboczej zębów kół odpowiada zakresom rezonansowym punktów pomiarowych, przedstawionych na rysunkach 4-5. A zatem,

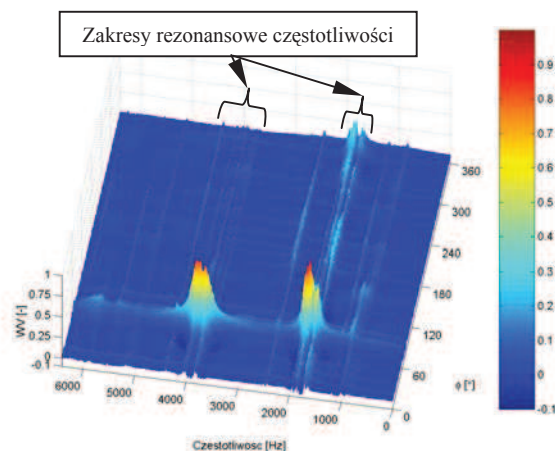
podczas diagnozowania tego typu zużycia, powinno się poszukiwać jego symptomów w rezonansowych zakresach częstotliwości tych punktów.

Podobne zależności występują także w przypadku analiz czasowo-częstotliwościowych sygnału drganiowego, zarejestrowanego w różnych fazach wykruszenia zęba.

Analiza prędkości drgań poprzecznych wału przekładni oraz przyśpieszeń drgań obudowy przekładni wykazała, że w rozkładach Wignera-Ville'a obserwuje się zmiany energetyczne w zakresie czasu przyporu wykruszonego zęba (rys.9 i 10). Największe zmiany składowych sygnału drganiowego, podobnie jak w przypadku poprzednim, występują w rezonansowych zakresach częstotliwości punktów pomiarowych, przedstawionych na rysunkach 5-6. Jedynie w zakresie częstotliwości rezonansowej 1,4 kHz, nie występuje wzrost amplitudy sygnału drganiowego, gdyż zakres tego pasma odpowiada drugiej harmonicznej częstotliwości zazębienia, usuniętej podczas wstępnej filtracji.



Rys.9. Rozkłady WV wyznaczone w przypadkach wykruszenia zęba koła - pomiar drgań wału przekładni



Rys.10. Rozkłady WV wyznaczone w przypadkach wykruszenia zęba koła - pomiar drgań obudowy przekładni

6. PODSUMOWANIE

W trakcie przeprowadzonych badań wyznaczono transmitancję wzajemną i własną wybranych punktów pomiarowych wałów i obudowy przekładni (m.in. rys. 4-6). Otrzymane wyniki analiz pozwoliły na wyznaczenie rezonansowych zakresów częstotliwości tych punktów pomiarowych.

Na charakter funkcji transmitancji duży wpływ miał wybór miejsca wymuszenia oraz realizacji pomiaru. Dokładne określenie struktury rezonansowej przekładni zębatej wymaga więc przeanalizowania zarówno własnej, jak i wzajemnej transmitancji wybranych punktów pomiarowych.

Na podstawie analizy rozkładów Wignera-Ville'a sygnałów drganiowych zarejestrowanych w przypadkach zużycia powierzchni roboczej zębów i wykruszenia zęba, stwierdzono, że uszkodzeniom tym towarzyszą wyraźne przyrosty amplitudy sygnałów w zakresie częstotliwości rezonansowych punktów pomiarowych przekładni.

LITERATURA

1. Wilk A., Łazarz B., Madej H.: Metody przetwarzania sygnałów drganiowych w diagnozowaniu przekładni zębatych, *Proced. 3rd International Congress of Technical Diagnostics, Diagnostics'2004, September 6-9, 2004, Poznań, Poland. Diagnostyka vol. 30, t. 2, 2004, 183-186.*
2. Radkowski S.: Wykorzystanie SWA w diagnozowaniu zmęczeniowych uszkodzeń kół zębatych. *Mat. II Seminarium Wibroakustyczna Diagnostyka Procesów Zmęczeniowych, Warszawa, listopad 2002, 35-52.*
3. Bartelmus W., Zimroz R: Cepstrum, widmo obwodni i bispectrum w diagnostyce wielostopniowych przekładni zębatych, *Proced. 3rd International Congress of Technical Diagnostics, Diagnostics'2004, September 6-9, 2004, Poznań, Poland, Diagnostyka vol. 30, t. 1, 2004r. 39-44.*
4. Figlus T., Wilk A.: Diagnozowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych w eksperymencie czynnym. *Mat. III Seminarium Degradacji Systemów, Warszawa 2003, Diagnostyka vol. 31, 2004r. 67-72.*
5. Wilk A., Figlus T.: Wykrywanie zużycia powierzchni roboczych kół zębatych w złożonym sygnale drganiowym, *Mat. IV Seminarium Degradacji Systemów Technicznych, Warszawa, listopad 2004, rozdział w monografii.*
6. Figlus T., Wilk A.: Zastosowanie metod wibroakustycznych do diagnozowania złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych, *Proced. 3rd International Congress of Technical Diagnostics, Diagnostics'2004, September 6-9, 2004, Poznań, Poland, Diagnostyka vol. 30 tom 1 2004r., 171-174.*

7. Figlus T., Wilk A.: Diagnostowanie stanu kół zębatych przekładni w obecności uszkodzeń łożysk tocznych na podstawie analiz drgań korpusu przekładni, Mat. XXXII Ogólnopolskiego Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 28.02.-05.03.2005r.
8. Madej H.: Minimalizacja aktywności wibroakustycznej przekładni zębatych, Monograficzna seria Wydawnicza Biblioteki Problemów Eksploatacji, Katowice-Radom 2003.
9. Madej H.: Zastosowanie eksperymentalnej analizy modalnej i charakterystyk rezonansowej przekładni zębatej, Zagadnienia Analizy Modalnej Konstrukcji Mechanicznych, praca zbiorowa po redakcją T.Uhla, KRiDM AGH, Kraków 2003, 177-186.
10. Uhl T.: Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych, WNT, Warszawa 1997.
11. Uhl T., Kurowski P.: VIOMA – Instrukcja użytkownika.
12. Signal Processing Toolbox User's Guide, The MathWorks 1999.



Dr inż. Tomasz FIGLUS jest adiunktem w Katedrze Budowy Pojazdów Samochodowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej. Zajmuje się diagnostowaniem 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 diagnostowaniem napędów zębatych metodami wibroakustycznymi oraz badaniami dynamicznymi układów napędowych z przekładniami zębatymi.