

SELEKCJA PRZESTRZENNA SYGNAŁU DRGANIOWEGO ZORIENTOWANA NA DIAGNOZOWANIE PRZEKŁADNI ZĘBATYCH

Grzegorz WOJNAR

Politechnika Śląska Wydział Transportu
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice
tel: 032 603 41 93, e-mail: grzegorz.wojnar@polsl.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki selekcji przestrzennej sygnału drganiowego ukierunkowanej na określenie takiego punktu i kierunku pomiarowego, w którym rejestrowany sygnał drganiowy będzie najbardziej użyteczny do diagnozowania uszkodzenia przekładni polegającego na wykruszeniu wierzchołka zęba. W warunkach laboratoryjnych przeprowadzono eksperymenty czynne polegające na pomiarach przyspieszeń i prędkości drgań wybranych punktów obudowy przekładni oraz prędkości drgań poprzecznych jej wałów. Przeprowadzone badania pozwoliły na zaproponowanie nowej miary przydatnej do wykrywania uszkodzeń kół zębatach, a wykorzystującej wyniki analizy Wignera Ville'a.

Słowa kluczowe: przekładnia zębata, wibrometr laserowy, uszkodzenia kół zębatach, analiza Wignera Ville'a.

SPATIAL SELECTION OF VIBRATION SIGNAL ORIENTED ON TOOTH GEAR DIAGNOSTICS

Summary

This paper presents carried out laboratory tests, which were aimed at qualification such point and direction measuring, in which recorded vibration signal will be the most useful to diagnostics of early stages of the pinion tooth chipping. The vibration acceleration of gear housing and transverse vibration velocity were measured. Based on the investigation useful measure in diagnostics of pinion tooth chipping was proposed.

Keywords: Gear, laser vibrometer, laser measurements, tooth damage, Wigner Ville analysis.

1. WPROWADZENIE

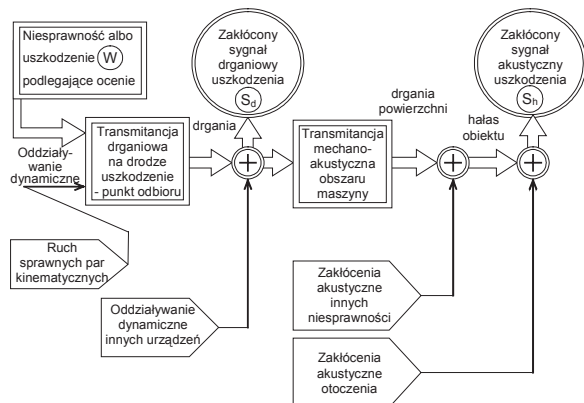
Ze względu na powszechne stosowanie przekładni zębatach, istnieje potrzeba diagnozowania nawet pojedynczych par kół, od których czasami zależy życie ludzkie bądź dalsza egzystencja przedsiębiorstwa. Problemem tym zajmuje się wiele ośrodków na całym świecie wykorzystując do tego celu głównie metody drganiowe. W National Aeronautics and Space Administration (NASA) od wielu lat prowadzone są badania mające na celu opracowanie wiarygodnych metod wykrywania wczesnych stadiów uszkodzeń kół zębatach przekładni helikopterowych [3]. Pomimo, iż na temat diagnozowania przekładni zębatach dużych mocy istnieje wiele opracowań, autorzy często wskazują na trudności w jednoznacznym wykrywaniu miejscowych uszkodzeń kół [3], ponieważ w początkowej fazie defekty te nie powodują zauważalnych zmian ogólnego poziomu drgań [11]. W diagnostyce drganiowej przekładni zębatach najczęściej wykorzystywane są piezoelektryczne przetworniki przyspieszeń umieszczone na obudowie przekładni. W literaturze autorzy zwracają uwagę na to, że są niezbędne dalsze badania między innymi ze względu na ciągły rozwój aparatury pomiarowej i metod przetwarzania

sygnałów. W Katedrze Budowy Pojazdów Samochodowych Politechniki Śląskiej od kilku lat prowadzone są intensywne prace mające na celu stworzenie systemu diagnozowania przekładni zębatach bazującego na nowoczesnych technikach pomiaru i analizy sygnałów drganiowych. W opracowaniach [6,7] przedstawiono metodę diagnozowania uszkodzeń łożysk przekładni. Równolegle pracowano nad efektywnymi metodami wykrywania różnych uszkodzeń kół zębatach wykorzystującymi zaawansowane metody analizy sygnałów wibroakustycznych [12,8,13,14]. Na bazie uzyskanych doświadczeń podjęto próbę rozwiązania problemu wykrywania uszkodzeń kół zębatach w przypadku występowania defektów innych elementów przekładni. Zostało to przedstawione m.in. w [4]. Jako narzędzie wspomagające cały proces diagnozowania stworzono model dynamiczny przekładni zębatach w układzie napędowym [5] oraz przeprowadzono identyfikację jego parametrów [5,13]. Obecnie finalizowane są prace związane z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji w opisywanym procesie diagnostycznym [9]. W żadnym z tych opracowań nie przedstawiano jednak wpływu rejestrowanego procesu, kierunku pomiarów drgań oraz wyboru punktu pomiarowego

na wyniki analiz zorientowanych na wykrywanie uszkodzeń kół zębatach. Tematykę tę podjęto w niniejszej pracy.

2. WYBÓR PROCESU JAKO ŹRÓDŁA INFORMACJI O STANIE DYNAMICZNYM MASZyny

W pracy [1] przedstawiono tok postępowania w odtwarzaniu modelu informacyjnego maszyny z niesprawnością typu mechanicznego. Model ten, przedstawiony na rys. 1 można również przyjąć w przypadku badania przekładni zębataj.

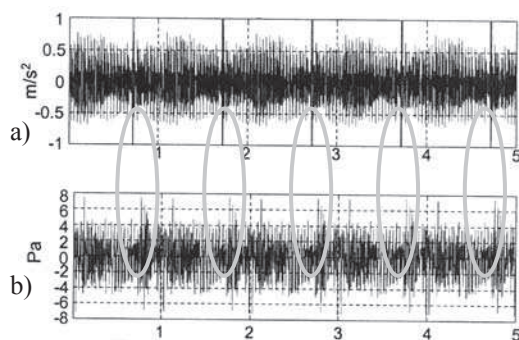


Rys. 1. Schemat tworzenia sygnałów drganiowego i akustycznego związanych z niesprawnością mechaniczną maszyny [1]

Sygnał drganiowy pochodzący od uszkodzenia mechanicznego podlegającego ocenie może być zakłócony jedynie przez ruch bliskich par kinematycznych oraz przez sygnały innych uszkodzeń w tym obszarze (rys. 1). Natomiast sygnał akustyczny dodatkowo może być zakłócony przez efekty akustyczne: pochodzące od innych niesprawności w maszynie oraz związane z własnościami otoczenia pomiarowego. Jeżeli sytuacja pomiarowa będzie zgodna przedstawioną na rysunku 1, to sygnał drganiowy będzie zawierał mniej informacji zbędnych z punktu widzenia celu diagnozy [1].

Fakt ten potwierdzają badania różnych autorów m.in. pochodzące z pracy [15] gdzie przedstawiono przebiegi czasowe przyspieszeń drgań i ciśnienia akustycznego tuż przed wyłamaniem zęba (rys. 2). Nawet w tak zaawansowanym stadium uszkodzenia wnioskowanie diagnostyczne na podstawie sygnału ciśnienia akustycznego (rys. 2b) nie jest jednak tak jednoznaczne jak na podstawie sygnału przyspieszeń drgań (rys. 2a).

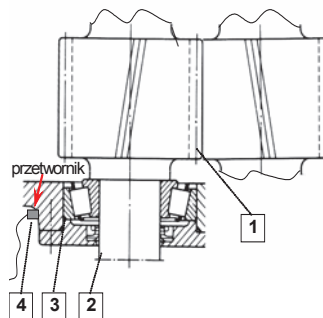
Dlatego w niniejszej pracy do wykrywania lokalnych uszkodzeń kół zębatach wykorzystano tylko sygnały drganiowe takie jak: przyspieszenia drgań wybranych punktów obudowy przekładni, które mierzono piezoelektrycznym przetwornikiem przyspieszeń oraz prędkość drgań elementów przekładni, którą mierzono przy użyciu wibrometru laserowego Ometron VH300+.



Rys. 2. Przebiegi czasowe przyspieszeń drgań (a) i ciśnienia akustycznego (b) tuż przed wyłamaniem zęba [15]

3. SELEKCJA PRZESTRZENNA SYGNAŁU DRGANIOWEGO

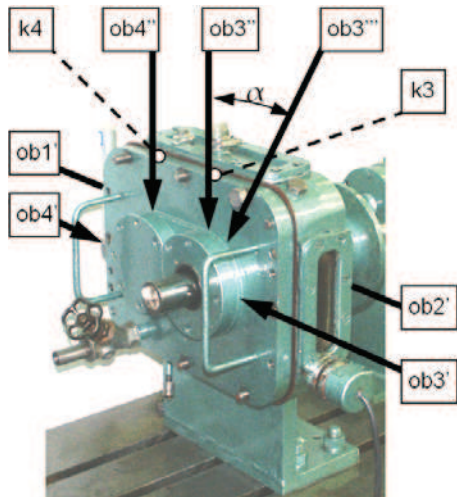
Istotnym problemem z punktu widzenia diagnostyki jest selekcja przestrzenna sygnału drganiowego. Od wyboru odpowiedniego punktu i kierunku pomiarowego, zależy bowiem prawdopodobieństwo wykrycia uszkodzenia. Piezoelektrycznym przetwornikiem przyspieszeń drgań pomiaru dokonuje się zazwyczaj na obudowie przekładni np. w punkcie 4 (rys. 3), rzadziej na kole ze względu na konieczność demontażu przekładni oraz potrzebę stosowania układów przesyłania sygnałów z wirujących kół.



Rys. 3. Przekrój przekładni zębataj
1- strefa ząbienia, 2-wał, 3-miejsce powstawania drgań obudowy, 4 – miejsce pomiaru drgań przetwornikiem przyspieszeń [10]

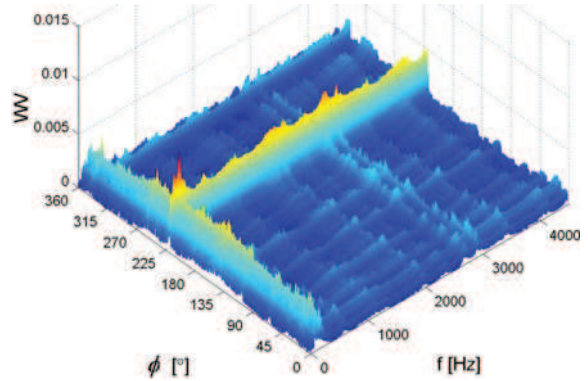
Wibrometr laserowy umożliwia pomiar drgań wirującego wału w punkcie 2 (rys. 3). W tym przypadku droga sygnału generowanego przez uszkodzenie (koła zębata lub łożyska) ulega skróceniu. Tym samym mniejszy jest wpływ zakłóceń i łatwiej jest wykryć uszkodzenie elementu przekładni. Obiektom badań doświadczalnych była przekładnia badana stanowiska pracującego w układzie mocy krążącej [2], w której zamontowany był komplet kół o zębatach prostych, posiadających następujące parametry geometryczne: odległość osi 91,5 mm, szerokość ząbienia 20 mm, moduł 4,5 mm, liczba zębów zębniaka $z_1=16$, liczba zębów koła $z_2=24$ współczynnik przesunięcia zarysu $x_1 = 0,8635$ i $x_2 = -0,5$. Podczas badań mających na celu wykrywanie wykruszenia wierzchołka zęba zębniaka jego prędkość obrotowa wynosiła około 2700 obr/min, a moment obciążenia przekładni

$M_2=207 \text{ Nm}$ ($Q=2,57 \text{ MPa}$). Przetwornikiem przyspieszeń drgań mierzono w kierunku pionowym tylko drgania obudowy łożyska w punktach k3 i k4 (rys. 4). W celu znalezienia najlepszego punktu pomiarowego, takiego, w którym najwcześniej można wykryć uszkodzenie koła zębatego, wibrometrem laserowym wykonywano także pomiary prędkości drgań wirujących wałów oraz wybranych punktów obudowy (ob1, ob2, ob3, ob4, -rys. 4) w kierunku działania siły międzyzębnej oraz poziomo i pionowo.



Rys. 4. Położenie punktów pomiarowych przekładni badanej : obudowa łożyska nr 3 - ob3, obudowa łożyska nr 4 - ob4, punkt nr 3 - k3, punkt nr 4 - k4, punkty pomiarowe ob1 i ob2 leżą podobnie jak punkty ob4 i ob3 ale symetrycznie po przeciwnej stronie przekładni, α – kąt przyporu

Nominalnie liczba przyporu ϵ_α dla badanej pary zębów wynosiła 1,33. Wykruszenie zęba zębника, które modelowano poprzez skrócenie zęba spowodowało zmniejszenie czołowej liczby przyporu uszkodzonej pary zębów (skrócenie 1 mm - $\epsilon_\alpha=1,21$; 2 mm - $\epsilon_\alpha=1,08$; 3 mm - $\epsilon_\alpha=0,96$; 4 mm - $\epsilon_\alpha=0,82$). Wykruszony ząb zębника współpracował z zębem koła w zakresie kąta obrotu wału Φ 200÷230° mierzono względem rejestrowanego synchronicznie sygnału referencyjnego związanego z obrotem zębника. W przypadkach lokalnych uszkodzeń kół zębatych takich jak wykruszenie zęba pojawiają się w sygnale drganiowym niskoenergetyczne zaburzenia [11]. Wyniki selekcji przestrzennej przedstawiono na przykładzie metody analizy sygnału zaproponowanej w pracy [13] ponieważ była ona bardzo wrażliwa na wystąpienie wykruszenia zęba. Zgodnie z algorytmem przedstawionym w [8,13] wygenerowano sygnał różnicowy. W sygnale tym nie zawsze można było wyróżnić zaburzenie pochodzące od uszkodzenia dlatego dokonano rozkładu czasowo-częstotliwościowego tegoż sygnału. Wykorzystano pseudo transformatę Wignera -Ville'a - $WV(t, f)$ (rys.5). W celu łatwiejszej interpretacji uzyskanych wyników dokonano sumowania dyskretnych wartości rozkładów WV zgodnie z zależnością 1 (rys. 6, 7, 8).

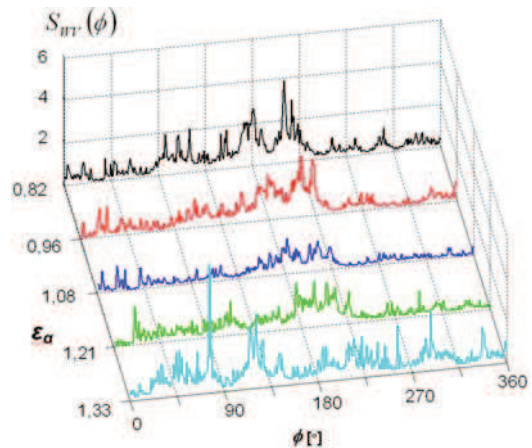


Rys. 5. Rozkład WV sygnału różnicowego – pomiar prędkości drgań wału zębника w kierunku działania siły międzyzębnej – wykruszenie zęba zębника 1 mm - $\epsilon_\alpha=1,21$;

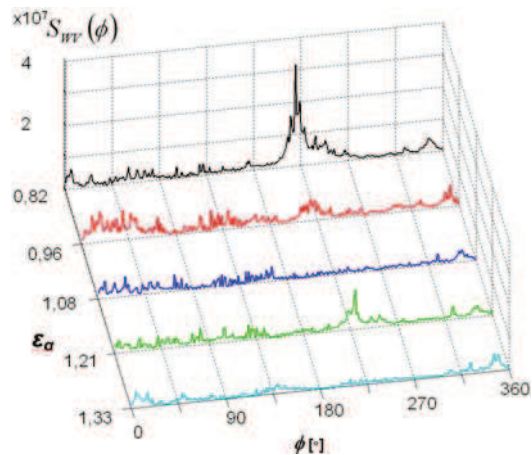
$$S_{WV}(\phi) = \sum_{k_{WV}=A}^B WV(t_{WV}, k_{WV}), \quad (1)$$

gdzie:

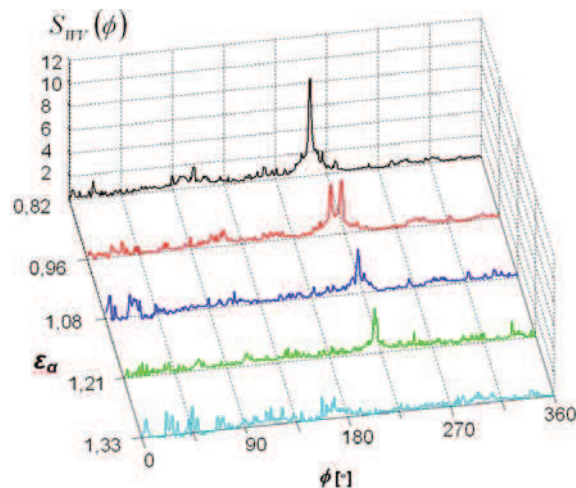
t_{WV}, k_{WV} – dyskretnne wartości odpowiednio czasu i częstotliwości,
 A, B – dyskretnne wartości odpowiadające odpowiednio częstotliwościom granicznym przedziału sumowania $f_A=0, f_B=4500[\text{Hz}]$



Rys. 6. Suma $S_{WV}(\phi)$ wykonana z sygnału różnicowego prędkości drgań wału zębника zmierzonego w kierunku poziomym



Rys. 7. Suma $S_{WV}(\phi)$ w paśmie wykreślnych drgań wykonana z sygnału różnicowego – pomiar przyspieszeń drgań w kierunku pionowym – punkt k3



Rys. 8. Suma $S_{wv}(\phi)$ wykonana z sygnału różnicowego prędkości drgań wału zębniaka zmierzonego w kierunku działania siły międzyzębnej

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy pomiarów wykonywanych w różnych punktach i kierunkach pomiarowych oraz różnych stadiach zaawansowania uszkodzenia stwierdzono, że wnioskowanie diagnostyczne na podstawie sygnału prędkości drgań poprzecznych wałów zmierzonego w kierunku poziomym jest trudne i niejednoznaczne (rys. 6). W przypadku analizy sygnału przyspieszeń drgań zmierzonych w punkcie k3 w kierunku pionowym (rys. 7) wykrycie zęba zębniaka wynoszące 1 mm spowodowało znaczny wzrost zaproponowanej sumy $S_{wv}(\phi)$ w zakresie kąta obrotu odpowiadającego współpracy uszkodzonego zęba, ale wykrycie uszkodzenia 2 lub 3 mm już nie było możliwe. Identyczna sytuacja miała miejsce w przypadku sumy $S_{wv}(\phi)$ uzyskanej z sygnału przyspieszeń drgań zmierzonych w punkcie k4. Najłatwiej można wykryć uszkodzenie koła zębatego dokonując pomiaru prędkości drgań poprzecznych wału zębniaka w kierunku działania siły międzyzębnej (rys. 8). Bardzo zbliżone wyniki uzyskano również w przypadku pomiaru prędkości drgań poprzecznych wału zmierzonych w kierunku pionowym [13]. Na podstawie tych sygnałów możliwe jest stworzenie miary wrażliwej na wczesne stadia uszkodzenia zębów kół, którą przedstawiono w pracy [13].

LITERATURA

- [1] Cempel Cz.: Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn. WNT Warszawa 1982 r.
- [2] Dąbrowski Z., Radkowski S., Wilk A.: Dynamika przekładni zębatych. Warszawa, Katowice, Radom 2000 r.
- [3] Decker H. J.: Gear Crack Detection Using Tooth Analysis. NASA/TM – 2002 – 211491 ARL- TR – 2681; 2002 r.
- [4] Figlus T., Wojnar G.: Zastosowanie metod wibroakustycznych do wykrywania wykruszenia zęba w obecności uszkodzeń łożysk

tocznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej – s. Transport z. 48, Gliwice 2003 r.

- [5] Łazarz B.: Zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym jako podstawa projektowania. Katowice-Radom 2001 r.
- [6] Łazarz B., Wojnar G.: Bezkontaktowe pomiary laserowe drgań w diagnostyce wibroakustycznej. XI Sympozjum Naukowe „Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej”, Katowice, 16.05.2003 r.
- [7] Łazarz B., Wojnar G.: Modelowanie lokalnych uszkodzeń łożysk tocznych w przekładni zębatej do celów diagnostycznych. Materiały V Krajowej Konferencji "Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów" DIAG' 2003.
- [8] Łazarz B., Wojnar G.: Detection of early stages of pinion tooth chipping in transmission gear. Machine Dynamics Problems 2003 r., Vol. 27.
- [9] Łazarz B., Madej H., Czech P.: Ciągła analiza falkowa jako podstawa klasyfikatora neuronowego typu SVM. XXXII Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn 2005 r.
- [10] Oehlmann H., Brie D., Tomczak M., Richard A.: A Method for Analysing Gearbox Faults Using Time-Frequency Representations. Mechanical Systems and Signal Processing 11 (4) 1997 r.
- [11] Radkowski S.: Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych, Warszawa-Radom 2002 r.
- [12] Wilk A., Łazarz B., Madej H., Wojnar G.: Metody wczesnego wykrywania lokalnych uszkodzeń kół zębatych. XXIX Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn 2002 r.
- [13] Wojnar G.: Wykrywanie uszkodzeń kół zębatych wybranymi metodami przetwarzania sygnałów drganiowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska 2004 r.
- [14] Wojnar G., Łazarz B. – praca zbiorowa pod red. S. Radkowskiego: Analiza ryzyka i diagnostyka procesów degradacyjnych i zmęzeniowych. Politechnika Warszawska, Warszawa 2004 r. str. 173÷179.
- [15] Zawisza M.: Wykorzystanie informacji zawartych w sygnale wibroakustycznym do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia awarii w przekładni zębatej. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska 2003 r.



Dr inż. Grzegorz WOJNAR obecnie jest adiunktem na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej. Specjalizuje się w zakresie modelowania procesów dynamicznych, projektowania maszyn oraz metod przetwarzania sygnałów.