

METODA POZYSKIWANIA SYGNAŁÓW RESZTKOWEGO I RÓŻNICOWEGO W PRZYPADKU PRACY PRZEKŁADNI ZĘBATEJ ZE ZMIENNYMI W CZASIE PRĘDKOŚCIAMI OBROTOWYMI I OBCIĄŻENIAMI

Grzegorz WOJNAR, Bogusław ŁAZARZ, Henryk MADEJ

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

Streszczenie

Jedną z metod wykrywania lokalnych uszkodzeń kół zębatach jest analiza sygnałów resztkowego i różnicowego. Sygnały te uzyskuje się poprzez odfiltrowanie z widma drgań odpowiednich częstotliwości. W metodzie tej zakłada się jednak stałą prędkość obrotową kół zębatach. Wiele przekładni zębatach nie pracuje ze stałą lecz zmienną w czasie prędkością obrotową. W niniejszej pracy przedstawiono bazującą na linowej interpolacji metodę pozyskiwania sygnałów resztkowego i różnicowego w przypadku pracy przekładni ze zmiennym w czasie momentem obciążenia oraz ze zmienną prędkością obrotową jej wałów.

Słowa kluczowe: przekładnie zębata, uszkodzenie zęba, zmienna prędkość obrotowa, zmienne obciążenie, sygnał resztkowy, sygnał różnicowy.

THE METHOD LOGGING OF RESIDUAL AND DIFFERENTIAL SIGNALS FOR GEAR WORKING WITH VARIABLES THE ROTATIONAL SPEEDS AND LOADS

Summary

Analyzing of residual and differential signals are usefulness methods for local damages detection. The filtration of signal is effectives if rotation speed is constant. This paper presents the method logging of residual and differential signals for gear working with variables rotation speeds and loads.

Keywords: Gear, different rotation speed, different loads, tooth damage, residual signal, differential signal.

1. WPROWADZENIE

Przekładnie zębata są powszechnie wykorzystywane w układach przeniesienia napędu. Znajdują zastosowanie zarówno w prostych przedmiotach codziennego użytku jak i w bardzo skomplikowanych urządzeniach produkcyjnych i transportowych wykorzystywanych w transporcie lądowym, wodnym oraz powietrznym. W ostatnich latach pojawiło się wiele publikacji dotyczących wykrywania uszkodzeń elementów przekładni zębatach. W pracach tych zaleca się m. in. stosowanie analizy sygnałów resztkowego oraz różnicowego zakładając stałą prędkość obrotową wałów. Tymczasem wiele przekładni nie pracuje ze stałą lecz zmienną w czasie prędkością obrotową. W niniejszej pracy przedstawiono bazującą na linowej interpolacji metodę pozyskiwania sygnałów resztkowego i różnicowego w przypadku pracy przekładni ze zmiennym w czasie momentem obciążenia oraz ze zmienną prędkością obrotową jej wałów. Ze względu na oszczędność czasu i środków finansowych prowadzone rozważania bazowały na wynikach symulacji komputerowych prowadzonych z wykorzystaniem zidentyfikowanego modelu

dynamicznego przekładni zębatach w układzie napędowym.

2. MODEL DYNAMICZNY

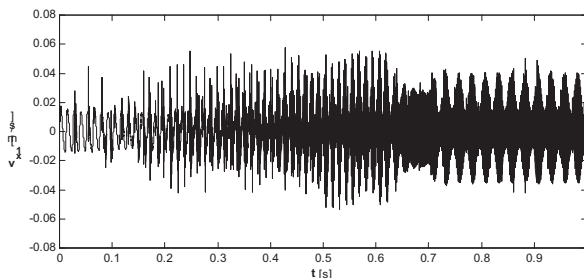
W ostatnich latach nastąpił znaczny rozwój w zakresie modelowania zjawisk dynamicznych. Stwierdzono, bowiem dużą przydatność badań symulacyjnych zarówno w procesie konstruowania jak i diagnozowania obiektów technicznych, a rozwój techniki cyfrowej umożliwił przeprowadzenie w stosunkowo krótkim czasie symulacji komputerowych bazujących na skomplikowanych modelach matematycznych. Obecnie praktycznie każdy ośrodek naukowy zajmujący się konstrukcją i diagnostyką układów przeniesienia napędu wykorzystuje mniej lub bardziej złożony model przekładni zębatach. Początkowo modelowano jednostopniowe wyizolowane z układu napędowego przekładnie zębata m. in. [9, 10, 6]. Z czasem zaczęły się pojawiać coraz bardziej zaawansowane modele przekładni zębatach o wielu stopniach swobody uwzględniające pracę silnika napędowego, jednostopniowej lub wielostopniowej przekładni

zębatej walcowej i maszyny roboczej [11, 3]. Szczegółowe przeglądy modeli dynamicznych można znaleźć między innymi w pracach [6, 8].

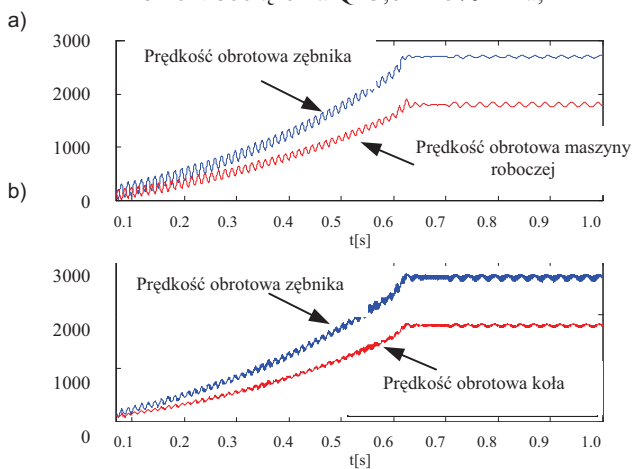
W niniejszej pracy do celów diagnostycznych wykorzystano opracowany na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym [8]. Zjawiska zachodzące w zazębieniu są opisane zgodnie z modelem L. Müllera [9, 10].

3. PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW

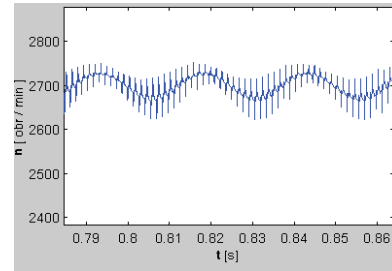
Diagnozowanie maszyn pracujących ze zmienną w czasie prędkością obrotową wałów wymaga zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów wibroakustycznych [1, 2, 4, 5, 7]. Na podstawie przedstawionego modelu dynamicznego przekładni zębatej w układzie napędowym uzyskano m. in. użyteczne diagnostyczne sygnały prędkości drgań poprzecznych wałów przekładni [14]. Sygnał przedstawiony rysunku 1 zarejestrowano w przypadku rozpędzania przekładni (rys. 2.3), na którą od chwili czasowej 0,7 s działał sinusoidalnie zmienny moment obciążenia. Obciążenie jednostkowe wynosiło $Q=3,84\pm 25\%$ MPa. Częstotliwość zmian momentu hamującego była równa 40 Hz. Symulowano pęknięcie podstawy zęba zębata powodujące zmniejszenie sztywności zazębienia o 20%. W pracy nie uwzględniano odchyłek wykonania kół zębatych. Przełożenie przekładni wynosiło 1,5.



Rys. 1. Sygnał prędkości drgań poprzecznych wału zębata zarejestrowanych w kierunku działania siły międzyzębnej – rozpędzanie i sinusoidalnie zmienny moment obciążenia $Q=3,84\pm 25\%$ MPa,



Rys. 2. Rozpędzanie przekładni i praca z prędkością obrotową oscylującą wokół stałej wartości - zmiany prędkości obrotowych: a) wirnika silnika napędzającego i maszyny roboczej, b) zębata i koła



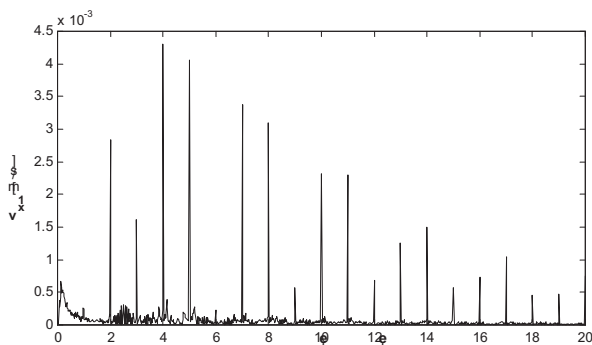
Rys. 3. Zmiany prędkości obrotowej zębata - powiększenie rys. 2

W prezentowanej metodzie konieczne jest zarejestrowanie sygnału referencyjnego związanego z obrotami diagnozowanego koła zębatego. Może być on mierzony na zewnątrz przekładni ale możliwie blisko koła zębatego, tak aby wyeliminować wpływ drgań skrętnych wałów przekładni. Ważne jest, aby na podstawie tego sygnału referencyjnego możliwe było określenie minimum obrotu wału o podziałkę zamontowanego na nim koła zębatego. Zastosowano wysoką częstotliwość próbkowania sygnału tak aby przy najwyższej prędkości obrotowej koła zębatego przypadało około 200 próbek na podziałkę. Następnie korzystając z procedury liniowej interpolacji [12] przepróbkowano sygnał drganiowy tak aby uzyskać dla każdego obrotu wału o podziałkę stałą liczbę próbek. Na rys. 4 przedstawiono (uzyskane na podstawie sygnału przedstawionego na rys. 1) nałożenie sygnałów drganiowych, których czas trwania równy jest obrotowi diagnozowanego koła zębatego o podziałkę zasadniczą.



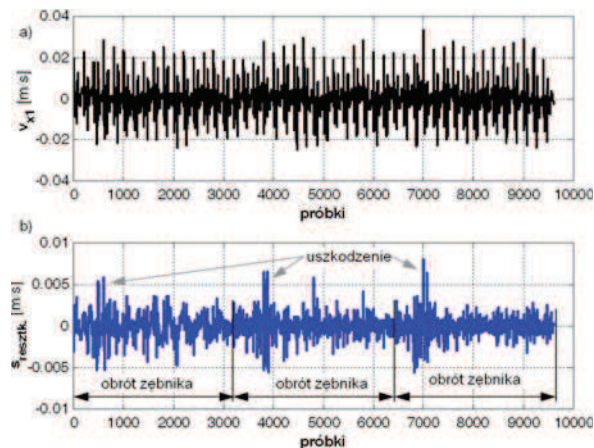
Rys. 4. Nałożenie sygnałów prędkości drgań poprzecznych wału zębata, których czas trwania równy jest obrotowi diagnozowanego koła zębatego o podziałkę zasadniczą – rozpędzanie i sinusoidalnie zmienny moment obciążenia

Na tej podstawie sygnału posiadającego stałą liczbę próbek na kąt obrotu o podziałkę koła uzyskano sygnał uśredniony okresem powtarzania skoków tych samych zębów zębata i koła. Na rys. 5 przedstawiono pseudo widmo, tego sygnału, w którym na osi odciętych występują kolejne harmoniczne częstotliwości zazębienia.



Rys. 5. Pseudo widmo uzyskane na podstawie sygnału uśrednionego okresem powtarzania skojarzeń tych samych zębów zębniaka i koła

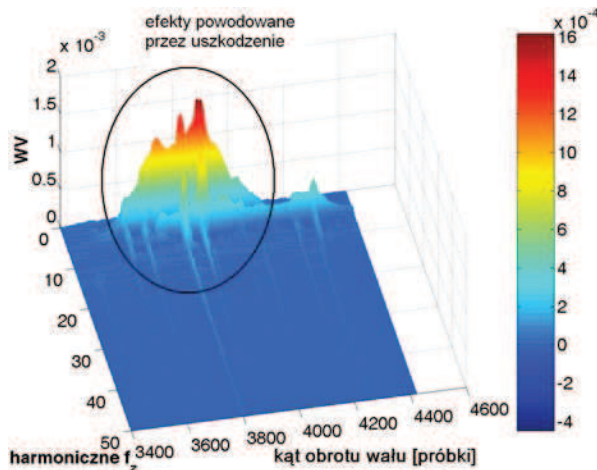
Na podstawie tak uzyskanego pseudo widma możliwe jest uzyskanie sygnałów resztkowego i różnicowego [13, 14] tak jak w przypadku stałej prędkości obrotowej wałów przekładni. Na rysunku 6 przedstawiono (uzyskane na podstawie sygnału przedstawionego na rys. 1) sygnał uśredniony okresem powtarzania skojarzeń tych samych zębów zębniaka i koła (rys. 6a) oraz sygnał resztkowy (rys. 6b), w którym widoczne są lokalne maksima wywołane pęknięciem podstawy zęba.



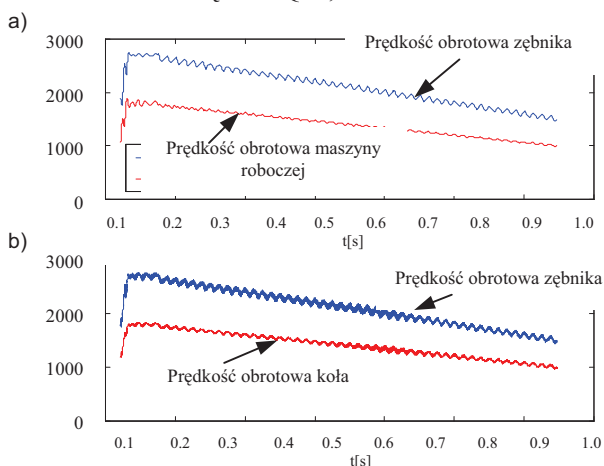
Rys. 6. Sygnał: a) sygnał uśredniony okresem powtarzania skojarzeń tych samych zębów zębniaka i koła, b) sygnał resztkowy

W celu łatwiejszej interpretacji uzyskanych wyników dokonano rozkładu Wignera-Ville'a (rys. 7), w którym osi częstotliwości odpowiadają kolejne harmoniczne częstotliwości zazębienia, a osi czasu odpowiada kąt obrotu diagnozowanego koła zębatego. Strzałką wskazano lokalne maksimum pochodzące od uszkodzenia koła zębatego.

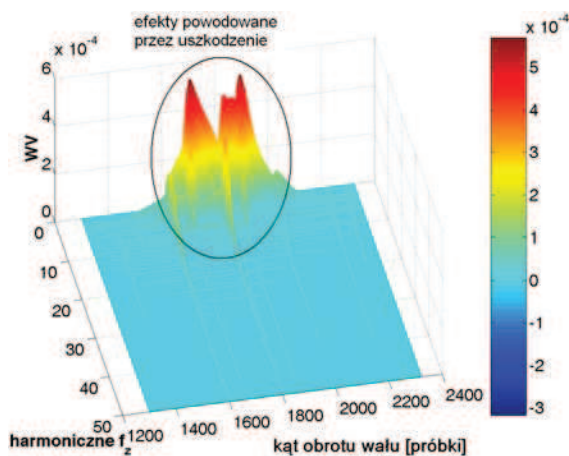
Przeprowadzono także badania podczas, których prędkość obrotowa wałów zmniejszała się (rys. 8). Również w tym przypadku stosując przedstawioną wcześniej metodę uzyskano rozkład Wignera-Ville'a, w którym wyraźnie widoczne są lokalne maksimum pochodzące od pęknięcia podstawy zęba zębniaka powodujące zmniejszenie sztywności zazębienia o 20% (rys. 9) i o 15% (rys. 10).



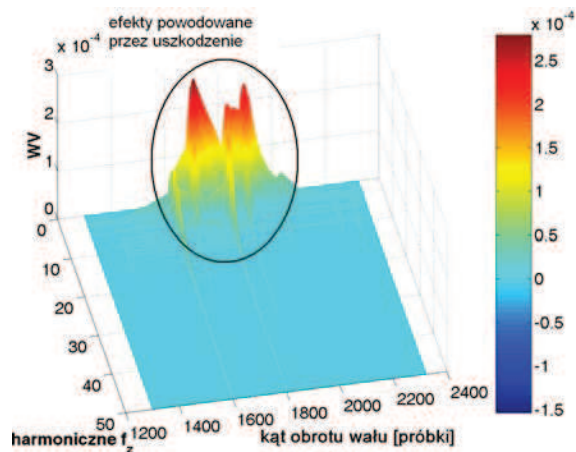
Rys. 7. Rozkład Wignera-Ville'a sygnału resztkowego uzyskanego w przypadku rozpędzania przekładni i sinusoidalnie zmiennego moment obciążenia $Q=3,84\pm 25\%$ MPa



Rys. 8. Zmniejszanie się prędkości obrotowej: a) wirnika silnika napędzającego i maszyny roboczej, b) zębniaka i koła



Rys. 9. Rozkład Wignera-Ville'a sygnału resztkowego uzyskanego w przypadku zmniejszania się prędkości obrotowej wałów przekładni i sinusoidalnie zmiennego moment obciążenia $Q=3,84\pm 25\%$ MPa, $\Delta c= -20\%$



Rys. 10. Rozkład Wignera-Ville'a sygnału resztkowego uzyskanego w przypadku zmniejszania się prędkości obrotowej wałów przekładni i sinusoidalnie zmiennego moment obciążenia $Q=3,84\pm 25\%$ MPa, $\Delta c=-15\%$

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące wnioski:

- Stosując metodę liniowej interpolacji możliwe jest uzyskanie użytecznych diagnostycznie sygnałów resztkowego i różnicowego w przypadku pracy przekładni ze zmienną w czasie prędkością obrotową wałów obciążonych sinusoidalnie zmiennym momentem hamującym.
- Zaproponowana metoda jest wrażliwa na zmniejszenie się sztywności zazębienia spowodowane pęknięciem podstawy zęba.

Przedmiotem dalszych prac będzie weryfikacja doświadczalna przedstawionej metody analizy sygnału niestacjonarnego.

LITERATURA

- [1] Adamczyk J., Krzyworzeka P., Cioch W.: *Dynamiczna redukcja niestacjonarności sygnału drganiowego maszyn wirnikowych*. XXIX Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn 2002 r., s. 9÷18.
- [2] Adamczyk J., Krzyworzeka P., Łopacz H.: *Systemy synchronicznego przetwarzania sygnałów diagnostycznych*. Collegium Columbinum, Kraków 1999.
- [3] Bartelmus W.: *Mathematical Modelling and Computer Simulations as an Aid to Gearbox Diagnostics*. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 15 2001, s. 855÷871.
- [4] Batko W., Ziółko M.: *Zastosowanie teorii falek w diagnostyce technicznej*. Problemy Inżynierii Mechanicznej i Robotyki – AGH, Kraków 2002.
- [5] Cioch W.: *Sztuczne sieci neuronowe w diagnostyce zagrożeń eksploatacyjnych systemów technicznych*. Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza 2004.
- [6] Dąbrowski Z., Radkowski S., Wilk A.: *Dynamika przekładni zębatych – Badania i symulacja w projektowaniu eksploatacyjnie zorientowanym*. Wydawnictwo i Zakład

Poligrafii ITE w Radomiu, Warszawa – Katowice – Radom 2000.

- [7] Krzyworzeka P.: *Synchroniczne wspomaganie odziorowań diagnostycznych*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2001.
- [8] Łazarz B.: *Zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym jako podstawa projektowania*. Wyd. i Zakład Poligrafii ITE w Radomiu, Katowice-Radom 2001.
- [9] Müller L.: *Przekładnie zębate - dynamika*. WNT, Warszawa 1986.
- [10] Müller L.: *Przekładnie zębate - projektowanie*. WNT, Warszawa 1996.
- [11] Radkowski S.: *Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych*, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksp. w Radomiu Warszawa- Radom 2002.
- [12] The MathWorks: *Signal Processing Toolbox For Use with Matlab, Version 5*. The MathWorks, Inc., 2001.
- [13] Wilk A., Łazarz B., Madej H., Wojnar G.: *Metody wczesnego wykrywania lokalnych uszkodzeń kół zębatych*. XXIX Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn 2002 r.
- [14] Wojnar G.: *Wykrywanie uszkodzeń kół zębatych wybranymi metodami przetwarzania sygnałów drganiowych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska 2004 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.



Dr hab. inż. Bogusław ŁAZARZ jest profesorem nzw. w Katedrze Budowy Pojazdów Samochodowych Wydziału 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 Sekcji Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn PAN.



Dr hab. inż. Henryk MADEJ jest profesorem nzw. w Katedrze Budowy Pojazdów Samochodowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej. Zajmuje się problematyką związaną z wibroakustyką maszyn, diagnostyką przekładni zębatych, mechatroniką i metrologią. Jest autorem i współautorem ok. 130 artykułów opublikowanych w czasopiśmie oraz materiałach konferencyjnych.