

Grzegorz WOJNAR, Bogusław ŁAZARZ, Henryk MADEJ

WYKRYWANIE USZKODZEŃ KÓŁ ZĘBATYCH PRACUJĄCYCH ZE ZMIENNYMI W CZASIE PRĘDKOŚCIAMI OBROTOWYMI

Streszczenie. W ostatnich latach pojawiło się wiele publikacji poświęconych diagnozowaniu przekładni zębatach pracujących ze stałą prędkością obrotową wałów. Metody proponowane w tych pracach bardzo często nie nadają się od bezpośredniego zastosowania gdy prędkość obrotowa wałów przekładni zmienia się znacząco lub nawet jeśli jedynie oscyluje wokół pewnej wartości. W niniejszym artykule przedstawiono bazującą na liniowej interpolacji metodę pozyskiwania sygnałów resztkowego i różnicowego w przypadku pracy przekładni ze zmiennym w czasie momentem obciążenia oraz ze zmienną prędkością obrotową jej wałów.

Na podstawie wyników badań symulacyjnych wykrywano pęknięcie podstawy zęba zębniaka w przypadku rozpędzania przekładni i pracy ze zmiennym w czasie momentem obciążenia oraz w przypadku gdy prędkość obrotowa wałów zmniejszała się od około 2700 obr/min do około 1000 obr/min i na przekładnię działał również zmienny w czasie moment obciążenia.

DETECTING OF TOOTH WHEEL FAULT 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 effectiveness 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.

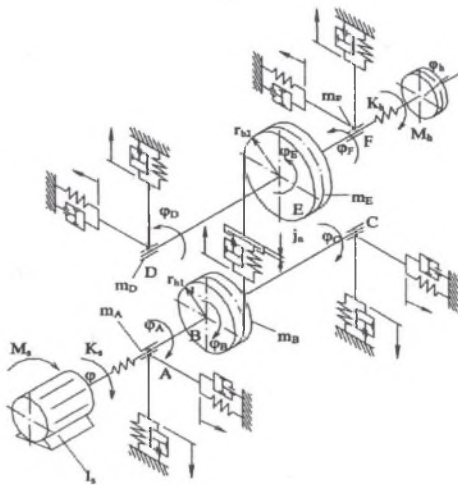
1. WPROWADZENIE

Przekładnie zębate ze względu na swoje liczne zalety wchodzą w skład dużej części układów napędowych umożliwiając zmianę prędkości obrotowej i momentu obrotowego. Dynamiczny rozwój urządzeń pomiarowych i metod analizy sygnałów, który nastąpił w ostatnich latach zaowocował pojawieniem się dużej liczby 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 układy napędowe statków i pojazdów lądowych oraz napędy maszyn w procesach technologicznych nie pracują ze stałą, lecz zmienną w czasie prędkością obrotową. W niniejszym artykule przedstawiono bazującą na liniowej interpolacji metodę pozyskiwania sygnałów resztkowego i różnicowego w przypadku pracy przekładni ze zmiennym w czasie momentem obciążenia oraz ze zmienną prędkością obrotową jej wałów.

2. IDENTYFIKACJA WSPÓŁCZYNNIKA TŁUMIENIA W ZAZĘBIENIU

W ostatnich latach nastąpił również 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 zębatej. Początkowo modelowano jednostopniowe wyizolowane z układu napędowego przekładnie zębate m. in. [9,10,6]. Z czasem zaczęły się pojawiać coraz bardziej zaawansowane modele przekładni zębatych 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 (rys. 1). Zjawiska zachodzące w zazębieniu są opisane zgodnie z modelem L. Müllera [9,10].

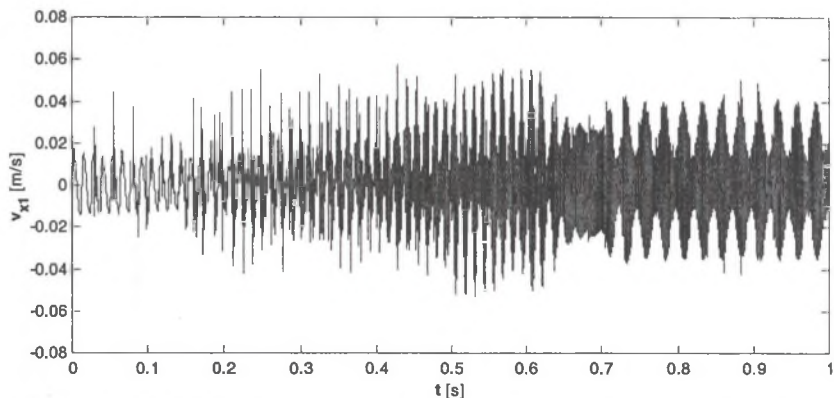


Rys. 1. Model dynamiczny układu napędowego z przekładnią zębatą
Fig. 1. Dynamic model of power transmission system with gearbox

3. PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW

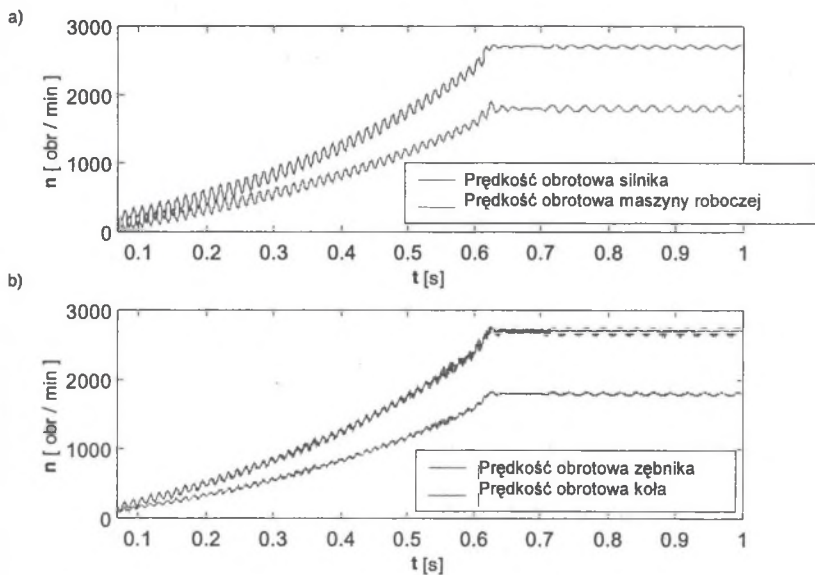
Diagnozowanie maszyn pracujących ze zmienną w czasie prędkością obrotową wałów wymaga zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów wibroakustycznych [1,2,4,5,7]. Na podstawie przedstawionego modelu dynamicznego przekładni zębatej w układzie napędowym uzyskano m. in. użyteczne diagnostyczne sygnały prędkości drgań poprzecznych wałów przekładni [14]. Sygnał przedstawiony rysunku 2 zarejestrowano w przypadku rozpędzania przekładni (rys. 3,4), 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 zębniaka

powodujące zmniejszenie sztywności zazębienia o 20%. W pracy nie uwzględniano odchyłek wykonania kół zębatach. Przełożenie przekładni wynosiło 1,5.



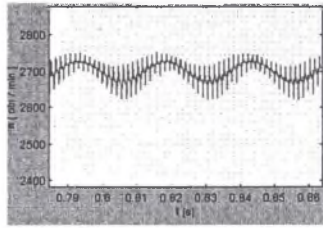
Rys. 2. Sygnał prędkości drgań poprzecznych wału zębata zarejestrowanych w kierunku działania siły międzyzębnej – rozpędzanie i sinusoidalnie zmienny moment obciążenia $Q=3,84\pm 25\%$ MPa,

Fig. 2. Pinion shaft transverse vibration velocity signal – recorded in direction of line of action – speed up and sine changing moment of load $Q=3,84\pm 25\%$ MPa,



Rys. 3. 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

Fig. 3. Speed up of gear and running with rotation speed oscillating around constant value - changes of rotation speed: a) rotor of engine and machine, b) pinion and gear



Rys. 4. Zmiany prędkości obrotowej zębniaka - powiększenie rysunku 3
 Fig. 4. Changes of rotation speed - zoom of figure 3

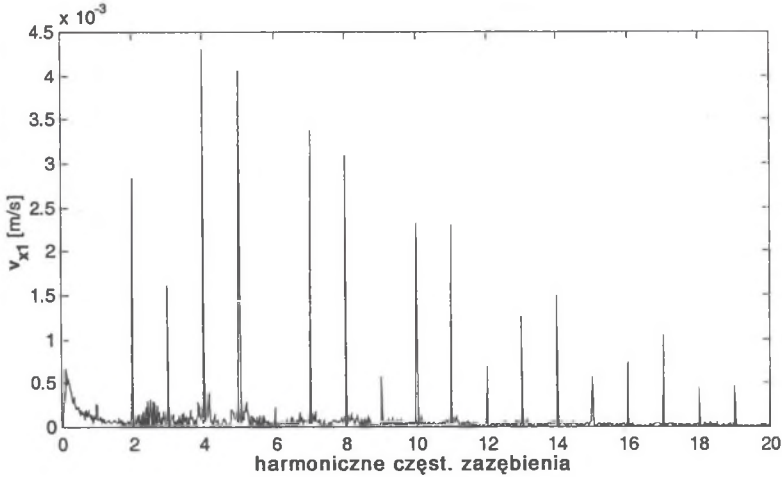
W prezentowanej metodzie konieczne jest zarejestrowanie sygnału referencyjnego związanego z obrotami diagnozowanego koła zębatego. Może być on mierzony na zewnątrz przekładni, ale możliwe blisko koła zębatego, tak aby wyeliminować wpływ drgań skrętnych wałów przekładni. Ważne jest, aby na podstawie tego 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 stałą liczbę próbek dla każdego obrotu wału o podziałkę. Na rysunku 5 przedstawiono (uzyskane na podstawie sygnału przedstawionego na rys. 2) nałożenie sygnałów drganiowych, których czas trwania równy jest obrotowi diagnozowanego koła zębatego o podziałkę zasadniczą.



Rys. 5. Nałożenie sygnałów prędkości drgań poprzecznych wału zębniaka, których czas trwania równy jest obrotowi diagnozowanego koła zębatego o podziałkę zasadniczą – rozpedzanie i sinusoidalnie zmienny moment obciążenia

Fig. 5. Superposition of pinion shaft transverse vibration velocity

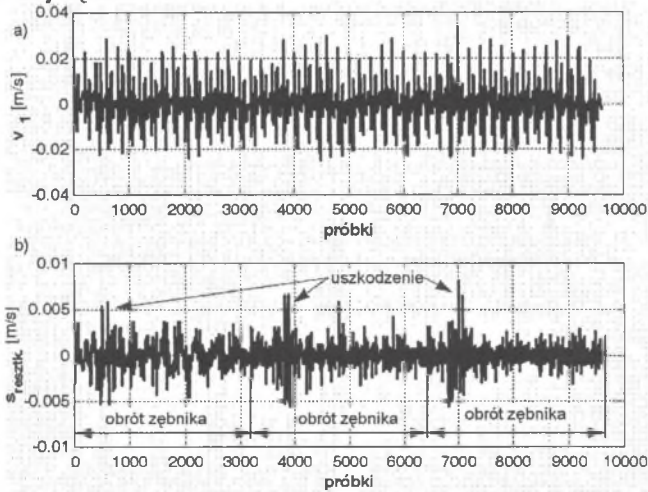
Na tej podstawie sygnału posiadającego stałą liczbę próbek na kąt obrotu o podziałkę koła uzyskano sygnał uśredniony okresem powtarzania skojarzeń tych samych zębów zębniaka i koła. Na rysunku 6 przedstawiono pseudowidmo tego sygnału, w którym na osi odczytanych występują kolejne harmoniczne częstotliwości zaszębenia.



Rys. 6. Pseudowidmo uzyskane na podstawie sygnału uśrednionego okresem powtarzania skojarzeń tych samych zębów zębnika i koła

Fig. 6. Pseudospectrum of averaged pinion shaft transverse vibration velocity signal

Na podstawie tak uzyskanego pseudowidma możliwe jest uzyskanie sygnałów reszkowego i różnicowego [13,14] tak jak w przypadku stałej prędkości obrotowej wałów przekładni. Na rysunku 7 przedstawiono (uzyskane na podstawie sygnału przedstawionego na rys. 2) sygnał uśredniony okresem powtarzania skojarzeń tych samych zębów zębnika i koła (rys. 7a) oraz sygnał reszkowy (rys. 7b), w którym widoczne są lokalne maksima wywołane pęknięciem podstawy zęba.



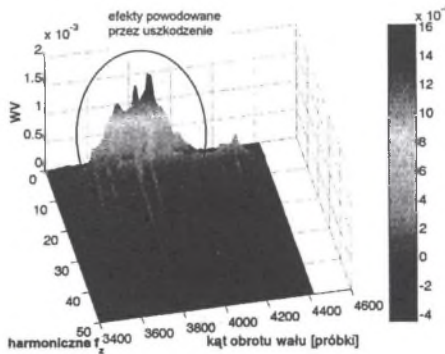
Rys. 7. Sygnał: a) sygnał uśredniony okresem powtarzania skojarzeń tych samych zębów zębnika i koła, b) sygnał reszkowy

Fig. 7. Signals a) averaged signal, b) residual signal

W celu łatwiejszej interpretacji uzyskanych wyników dokonano rozkładu Wignera-Ville'a (rys. 8), w którym osi częstotliwości odpowiadają kolejne harmoniczne częstotliwości

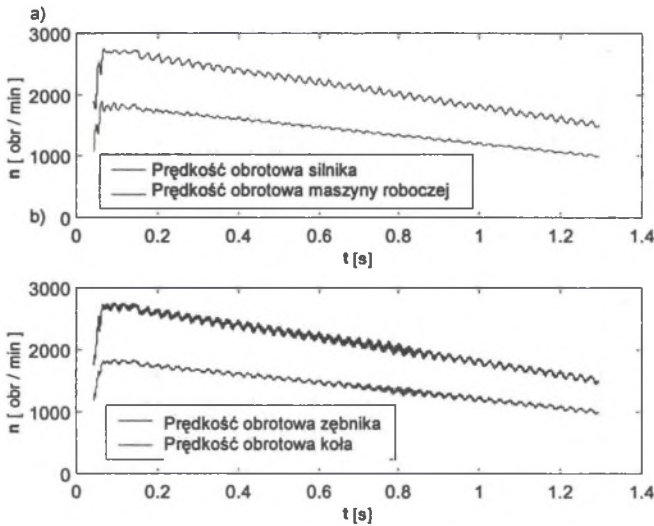
zazębenia, a osi czasu odpowiada kąt obrotu diagnozowanego koła zębatego. Strzałką wskazano lokalne maksimum pochodzące od uszkodzenia koła zębatego.

Przeprowadzono także badania, podczas których prędkość obrotowa wałów zmniejszała się (rys. 9). Również w tym przypadku stosując przedstawioną wcześniej metodę uzyskano rozkład Wignera-Ville'a, w którym wyraźnie widoczne są lokalne maksima pochodzące od pęknięcia podstawy zęba zębnika powodujące zmniejszenie sztywności zazębenia o 20% (rys. 10a) i o 15% (rys. 10b). W przypadku braku odchyłek wykonania kół zębatych wartość tego maksimum rośnie wykładniczo wraz z symulowanym uszkodzeniem zębnika (rys. 11).



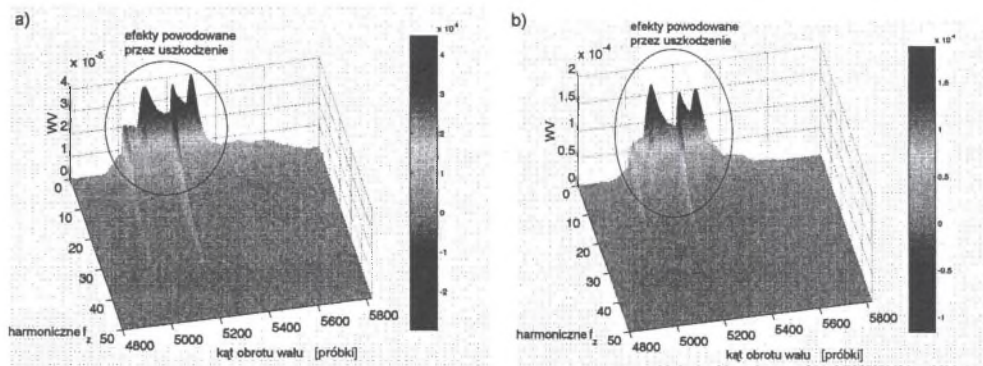
Rys. 8. Rozkład Wignera-Ville'a sygnału resztkowego uzyskanego w przypadku rozprędzania przekładni i sinusoidalnie zmiennego moment obciążenia $Q=3,84\pm 25\%$ MPa

Fig. 8. Wigner-Ville distribution of speed up and sine changing moment of load $Q=3,84\pm 25\%$ MPa



Rys. 9. Zmniejszanie się prędkości obrotowej: a) wirnika silnika napędzającego i maszyny roboczej, b) zębnika i koła

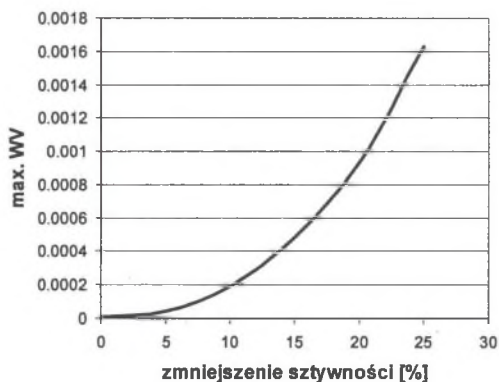
Fig. 9. Speed down of gear: a) rotor of engine and machine, b) pinion and gear



Rys. 10. Rozkład Wignera-Ville'a sygnału resztkowego uzyskanego w przypadku zmniejszania się prędkości obrotowej wałów przekładni i sinusoidalnie zmiennego momentu obciążenia $Q=3,84\pm 25\%$ MPa: a) $\Delta c = -10\%$, b) $\Delta c = -5\%$

Fig. 10. Wigner-Ville distribution of speed down and sine changing moment of load $Q=3,84\pm 25\%$ MPa: a) $\Delta c = -10\%$, b) $\Delta c = -5\%$

W przypadku braku odchyłek wykonania kół zębatach wartość lokalnego maksimum rozkładu WV rośnie wykładniczo wraz z symulowanym pęknięciem podstawy zębniaka (rys. 11).



Rys. 11. Wpływ symulowanego pęknięciem podstawy zębniaka na wartość maksymalną rozkładu Wignera-Ville'a sygnału resztkowego uzyskanego w przypadku zmniejszania się prędkości obrotowej wałów przekładni i sinusoidalnie zmiennego momentu obciążenia $Q=3,84\pm 25\%$

Fig. 11. Influence of crack of root tooth on maximum value of Wigner-Ville distribution of residual signal - speed down and the sine changing moment of load $Q=3,84\pm 25\%$

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., 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 zagrożenia 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 odwzorowań 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 Ekspl. 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.
14. Wojnar G.: Wykrywanie uszkodzeń kół zęba-tych wybranymi metodami przetwarzania sygnałów drganiowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska 2004.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski