Nr 123 Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 123
Studia i Materiały Nr 34 2008

uszkodzenia lokalne,
łożyska toczne,
układy napędowe przenośnika taśmowego
filtracja adaptacyjna,
separacja

Radosław ZIMROZ*

EKSTRAKCJA SYGNAŁU INFORMACYJNEGO NA POTRZEBY DIAGNOSTYKI ŁOŻYSK BĘBNÓW NAPĘDOWYCH PRZENOŚNIKA TAŚMOWEGO Z WYKORZYSTANIEM FILTRU ADAPTACYJNEGO REALIZUJĄCEGO LINIOWĄ PREDYKCJĘ

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące wykrywania uszkodzeń lokalnych w łożyskach tocznych na przykładzie łożysk zamontowanych w bębnach napędowych. Stosowane rozwiązania konstrukcyjne oraz różne właściwości sygnałów generowanych przez elementy układu napędowego powodują, że sygnał rejestrowany na obudowie łożyska bębna napędowego jest silnie zakłócony przez sygnał generowany przez przekładnię zębatą – mimo dzielącego obiekty dystansu. Różnice w poziomach amplitud są znaczące, co powoduje, że wykrycie uszkodzenia na podstawie nieprzetworzonego sygnału drganiowego jest niemożliwe. Konieczne jest odseparowanie sygnałów z przekładni i łożysk, lub innymi słowy ekstrakcja sygnału informacyjnego z zarejestrowanego sygnału drganiowego. Problem zakłócania sygnału z łożyska przez sygnał generowany przez zazębienie w przekładni a co za tym idzie zagadnienie separacji tych sygnałów sformułowany został przez Randall'a na potrzeby diagnozowania łożysk w przekładniach helikopterowych. Jednym z możliwych rozwiązań jest zastosowanie filtracji adaptacyjnej opartej na teorii liniowej predykcji sygnału. Wykorzystanie różnych właściwości statystycznych sygnałów generowanych przez przekładnie i łożyska pozwala oddzielić cześć deterministyczną (generowaną przez zazębienie) od losowej, niedeterministycznej (generowanej przez łożysko). Takie podejście zostało zastosowane z powodzeniem do przekładni helikopterowych, celem tej pracy jest sprawdzenie skuteczności metody w diagnozowaniu łożysk w bębnach napędowych. Różnica w obiektach jest zasadnicza – różne moce, gabaryty, prędkości obrotowe a co za tym idzie struktura częstotliwościowa sygnału drganiowego. Wstępne wyniki uzyskane po zastosowaniu tego podejścia są obiecujące, niemniej jednak należy starannie dobierać parametry filtracji.

* Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

1. WPROWADZENIE

Wykrywanie uszkodzeń lokalnych w elementach układu napędowego jest jednym z najistotniejszych zagadnień z punktu widzenia diagnostyki. Amplitudy sygnału związanego z inicjowanym uszkodzeniem są zwykle niewielkie [1], propagacja (rozwój uszkodzenia) w zależności od obciążenia łożyska może być bardzo szybka. W literaturze najczęściej opisywany jest problem diagnozowania łożysk tocznych w przekładniach zębatych [2–5]. Różnice w poziomach amplitud sygnałów generowanych przez zazębienie i łożysko toczne są znaczące, co powoduje, że wykrycie uszkodzenia na podstawie nieprzetworzonego sygnału drganiowego jest niemożliwe. Konieczne jest odseparowanie sygnałów z przekładni i łożysk, lub innymi słowy ekstrakcja sygnału informacyjnego z zarejestrowanego sygnału drganiowego. Problem zakłócania sygnału z łożyska przez sygnał generowany przez zazębienie w przekładni a co za tym idzie zagadnienie separacji tych sygnałów sformułowany został przez Ho i Randalla [2] na potrzeby diagnozowania łożysk w przekładniach helikopterowych. Jednym z możliwych rozwiązań jest zastosowanie filtracji adaptacyjnej opartej na teorii liniowej predykcji sygnału [5]. Wykorzystanie różnych właściwości statystycznych sygnałów generowanych przez przekładni i łożyska pozwala oddzielić cześć deterministyczną (generowaną przez zazębienie) od losowej, niedeterministycznej (generowanej przez łożysko). Takie podejście zostało zastosowane z powodzeniem do planetarnych przekładni helikopterowych, celem tej pracy jest sprawdzenie skuteczności metody w diagnozowaniu łożysk w bębnach napędowych.

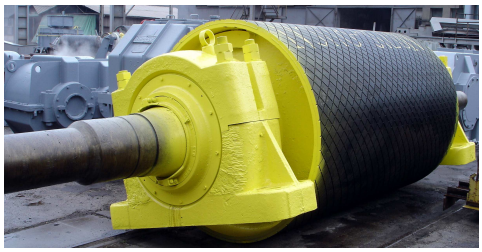
Okazuje się, że stosowane rozwiązane konstrukcyjne oraz różne właściwości sygnałów generowanych przez elementy układu napędowego powodują, że sygnał rejestrowany na obudowie łożyska bębna napędowego jest również silnie zakłócony przez sygnał generowany przez przekładnię zębatą – mimo dystansu dzielącego obiekty [6–7]. Problem wydaje się zbliżony do zagadnienia sformułowanego przez Randalla, jednakże skuteczność metody dla tego obiektu wymaga potwierdzenia. Różnica w obiektach jest zasadnicza – różne moce, gabaryty, prędkości obrotowe a co za tym idzie struktura częstotliwościowa sygnału drganiowego. Filtracja adaptacyjna oparta na liniowej predykcji jest bardzo wrażliwa na dobór parametrów przetwarzania. Autor niejednokrotnie sugerował, że metody z powodzeniem stosowane w diagnostyce układów napędowych w innych sektorach przemysłu nie znajdują bezpośredniego zastosowania w diagnostyce maszyn górniczych.

2. OPIS OBIEKTU

Diagnozowany obiekt to układ napędowy przenośnika taśmowego z dwustopniowa przekładnią zębatą o mocy 1000 kW połączoną poprzez sprzęgło z bębnem napędowym (Rys. 1–5). Pierwszy stopień przekładni jest stopniem stożkowym, drugi stopień jest walcowy. Zadanie diagnostyczne polega na detekcji uszkodzeń lokalnych w łożysku bębna

napędowego. Lokalizację czujników na bębnie i przekładni (wał wyjściowy) pokazano na Rys. 4–5.

Rys. 1. Diagnozowany obiekt: a) schemat, b) widok przekładni, sprzęgła i silnika.
Fig 1. Diagnosed object: a) scheme, b) view on engine, coupling and engine



Rys. 2. Bęben napędowy z łożyskami w obudowie osadzonymi na wale
Fig 2. Pulley with bearings mounted on shaft

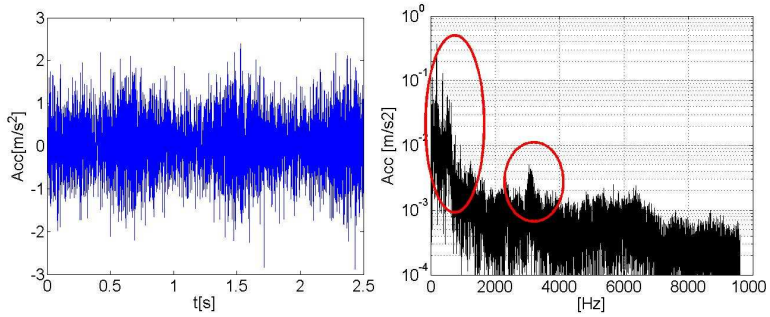
Rys. 3. Widok na połączenie wału zdawczego z bębnem napędowy
Fig. 3. View on joint of output shaft in gearbox with pulley

Rys. 4. Punkt pomiarowy na bębnie
Fig. 4. View on sensor location on pulley

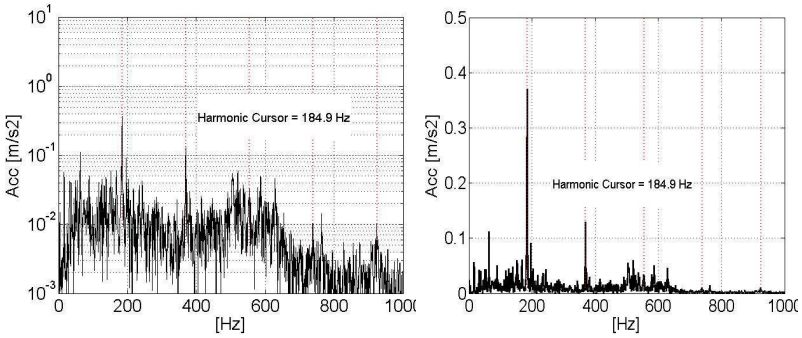
Rys. 5. Punkt pomiarowy na przekładni
Fig. 5. View on sensor location on gearbox

3. WSTĘPNE ANALIZY SYGNAŁÓW DIAGNOSTYCZNYCH Z ŁOŻYSKA

Po rejestracji sygnałów, konwersji danych i imporcie do środowiska Matlaba wykonano podstawowe analizy mające na celu identyfikację właściwości sygnałów drganiowych. Na rys. 6 pokazano przebieg czasowy sygnału zarejestrowanego na bębnie z wyraźną modulacją amplitudową prawdopodobnie pochodzącą od wału wyjściowego (T_{03}~1[s]). Analiza widmowa pozwala zidentyfikować dwa znacznie różniące się strukturą częstotliwościową zakresy oznaczone elipsami, rys. 6. W pierwszym zakresie (do 1000 Hz) można wyróżnić kilka dyskretnych składowych o częstotliwościach związanych z zazębieniem stopnia drugiego (fz2=184 Hz), rys. 7.



Rys. 6. Przebieg czasowy sygnału z bębna i jego widmo w skali logarytmicznej
Fig. 6. Vibration signal from pulley and its spectrum



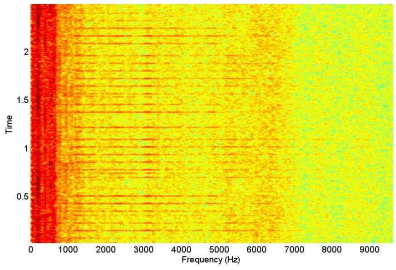
Rys. 7. Identyfikacja składowych w widmie sygnału a) w skali logarytmicznej b) w skali liniowej
Fig. 7. Identification of components in spectrum a) In log scale, b) In linear scale

Dla częstotliwości powyżej 1000 Hz widmo jest raczej płaskie i rozmyte – typowe dla sygnału typu szumowego. Dla częstotliwości ok. 3000 Hz występuje lokalny wzrost amplitud – prawdopodobnie związany z rezonansem struktury. Różnice w poziomach

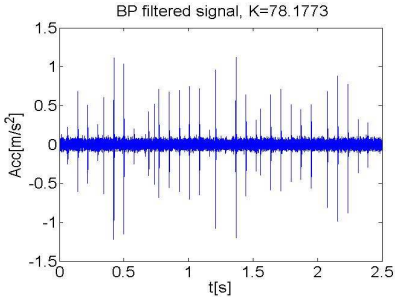
dla zakresu poniżej i powyżej 1000 Hz są bardzo duże (1000 razy!). Detekcja uszkodzenia łożyska na podstawie przebiegu czasowego czy widma jest w tym przypadku praktycznie niemożliwa.

Zastosowanie analizy czasowo–częstotliwościowej (Rys. 8.) pozwala wykryć powtarzające się cyklicznie szerokopasmowe zaburzenia struktury częstotliwościowej, co jest typowe dla występowania uszkodzenia lokalnego. Na podstawie czasowo–częstotliwościowej reprezentacji sygnału stwierdzono, że zaburzenie występuje w zakresie 1500–4500 Hz i dla takiego zakresu wykonano filtrację pasmowo przepustową sygnału. Na rysunku 9 pokazano wynik filtracji– sygnał jest wyraźnie impulsowy, wartość kurtozy jest bardzo wysoka.

Zastosowana powyżej procedura [8,9] jest stosunkowo prosta, niemniej jednak wymaga analizy struktury widmowej sygnału, określania pasma sygnału zawierającego informację oraz filtracji pasmowo przepustowej. Może się okazać ze wyodrębnione zakresy częstotliwości nie są rozłączne (nakładają się) i procedura staje się bezużyteczna [16]. Istnieje zatem uzasadniona potrzeba zastosowania innych metod ekstrakcji sygnału informacyjnego [11,16–17].



Rys. 8. Mapa czasowo–czestotliwościowa sygnału z bębna
Fig. 8. Time–frequency representation of signal from pulley

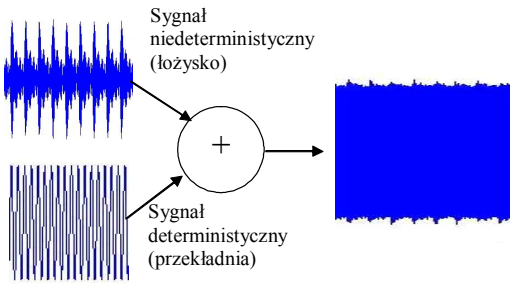


Rys. 9. Sygnał informacyjny (po filtracji pasmowo–przepustowej w zakresie 1500–4500[Hz])
Fig. 9. Signal of interest (after bandpass filtering at1500–4500[Hz])

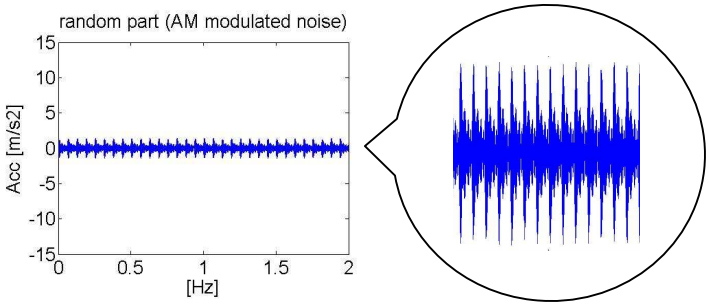
4. PROBLEM SEPARACJI A LINIOWA PREDYKCJA (FILTRACJA ADAPTACYJNA)

W poprzednim rozdziale wykazano, że sygnał rejestrowany na obudowie łożyska bębna napędowego charakteryzuje się skomplikowaną strukturą częstotliwościową, w której można wyróżnić dwa podzakresy (pasma) o odmiennych właściwościach. Jeden z tych podzakresów należy powiązać ze drugim stopniem przekładni zębatej (dyskretne widmo z wyraźnymi składowymi zazębienia) drugi z podzakresów związa-

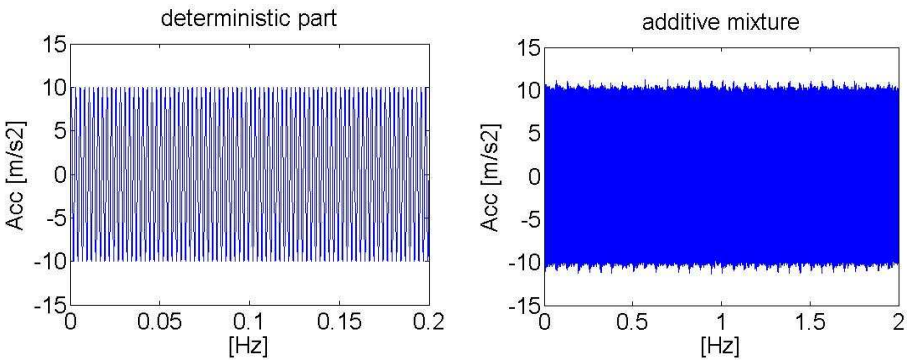
ny jest z uszkodzonym łożyskiem bębna napędowego. Na rysunku 10 pokazano uproszczony model powstawania sygnału rejestrowanego na obudowie łożyska.



Rys. 10. Model sygnału rejestrowanego na obudowie łożyska
Fig. 10. Model of signal captured from bearing housing



Rys. 11. Model sygnału generowanego przez uszkodzone łożysko
Fig. 11. Model of signal generated by damaged bearing

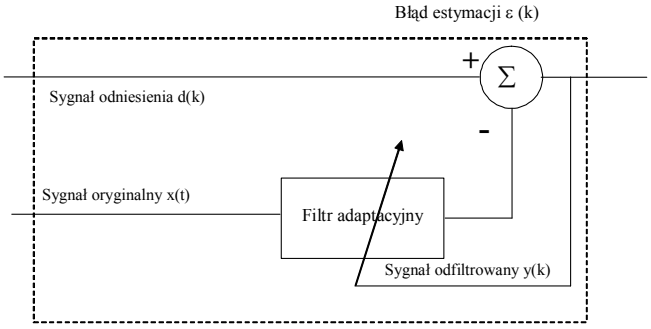


Rys. 12. Model sygnału generowanego przez przekładnię i suma sygnałów łożyska i przekładni
Fig. 12. Model of signal generated by gearbox and sum of bearing and gear signals

Analizując szczegółowo właściwości sygnałów można powiedzieć, że dobrym przybliżeniem sygnału z uszkodzonego łożyska jest szum biały zmodulowany amplitudowo [12]. Sygnał ten jest niedeterministyczny, ze względu na zjawiska zachodzące w łożysku tocznym należy mówić raczej o cyklu powtarzania impulsowych zaburzeń (w tym przypadku wywołanych przez uszkodzoną bieżnię) niż o ich okresie.

Sygnał z przekładni (przy założeniu stałej prędkości obrotowej na wejściu) jest deterministyczny i okresowy. Na potrzeby testowania metody separacji takich sygnałów dla uproszczenia przyjęto szum biały zmodulowany sygnałem poliharmonicznym (3 harmoniczne) oraz sygnał sinusoidalny (1 składowa zazębienia), rys. 11, 12.

Do separacji tak przygotowanych sygnałów wykorzystano metody filtracji adaptacyjnej. Metody adaptacyjnego przetwarzania sygnałów są obecnie jedną z najbardziej dynamicznie rozwijających się dziedzin automatyki, telekomunikacji itd. [13–15]. Zadaniem filtru adaptacyjnego jest przetworzenie sygnału wejściowego w sygnał wyjściowy o określonych właściwościach. Miarą „jakości" przetwarzania jest drugi z sygnałów wyjściowych określany mianem sygnału błędu, który stanowi podstawę do modyfikacji współczynników filtru (adaptacji), rys. 13. Sygnał błędu jest wyznaczany na podstawie porównania sygnału odfiltrowanego z sygnałem referencyjnym (1).



Rys. 13. Idea filtracji adaptacyjnej
Fig. 13. Idea of adaptive filtering

$$\varepsilon(n) = d(k) - y(k) \tag{1}$$

Sygnał odfiltrowany można zapisać:

$$y(n) = W^T(n)x(n) \tag{2}$$

gdzie W oznacza wektor współczynników filtru, T transpozycję wektora

$$W(n) = [w_0(n) \quad w_1(n) \ldots \quad w_{L-1}(n)]. \tag{3}$$

Zadaniem adaptacji jest taki dobór parametrów filtracji *W*, aby wartość błędu estymacji sygnału była minimalna.

$$FC = \min[\varepsilon^2(k)] = \min[(d(k) - y(k))^2], \tag{4}$$

gdzie *FC* – funkcja celu w procedurze adaptacji

W zastosowaniu do sygnałów drganiowych na potrzeby diagnostyki schemat z Rys. 13 ma niewielkie zastosowanie ze względu na problemy z pozyskaniem sygnału odniesienia. W pewnych przypadkach dokładna znajomośc postacji sygnału odniesienia nie jest konieczna, wystarczy np. znajomośc pewnych statystycznych właściwości, charakterystyk amplitudowych itd. W tym przypadku jako sygnał odniesienia wykorzystuje się opóźnioną wersję sygnału oryginalnego (Rys. 14).

$$x(n) = d(n - \Delta) \tag{5}$$

Sygnał wejściowy jest mieszaniną sygnałów o różnych właściwościach statystycznych: jeden z sygnałów jest deterministyczny, wąskopasmowy, kolejne próbki sygnału są silnie skorelowane z poprzednimi wartościami, co stanowi podstawę do przewidywania (predykcji) kolejnych wartości sygnału. Drugi z sygnałów jest szerokopasmowy, niedeterministyczny, predykcja kolejnych wartości na podstawie historii jest niemożliwa.

Idea działania filtru adaptacyjnego jest następująca.

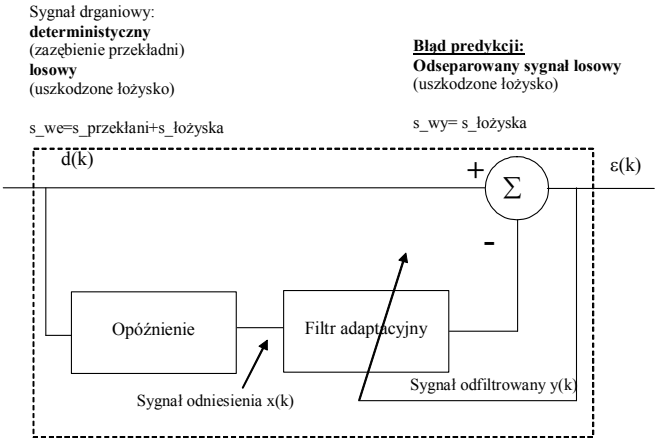
Zakładając, że sygnał wejściowy $d(k)=s(k)+z(k)$ jest sumą sygnałów, przy czym deterministyczny $s(k)$ jest nieskorelowany ze stochastycznym (zwykle zakłóceniem) $z(k)$ (tu sygnał z łożyska) możliwe jest przewidywanie wartości sygnału $s(k)$ w kolejnych chwilach k natomiast sygnału $z(k)$ przewidzieć się nie da. W efekcie na wyjściu filtru adaptacyjnego otrzymujemy sygnał $y(k)$ będący estymatą (przybliżeniem) sygnału deterministycznego $s(k)$.

Operacja odejmowania sygnałów d(k) i y(k) pozwala uzyskać sygnał

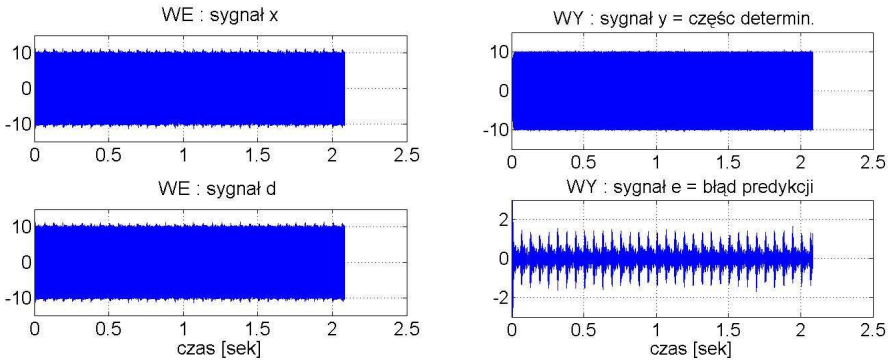
$$\varepsilon(n) = d(k) - y(k) = s(k) + z(k) - \hat{s}(k) = z(k)$$

w tym przypadku jest to niederministyczny, stochastyczny sygnał z uszkodzonego łożyska – sygnał użyteczny diagnostycznie. Zwykle, w klasycznym zadaniu filtracji, pod postacią $\varepsilon(k)$ znajduje się bezużyteczny, odfiltrowany szum, a odszumiony sygnał informacyjny zawarty jest w sygnale $y(k)$

Na rysunku 15 przedstawiono wyniki separacji dla sygnałów modelowych zdefiniowanych w poprzedniej części referatu. Na rysunku 15 przedstawiono sygnał wejściowy, sygnał opóźniony oraz odfiltrowaną część deterministyczną oraz stochastyczną.



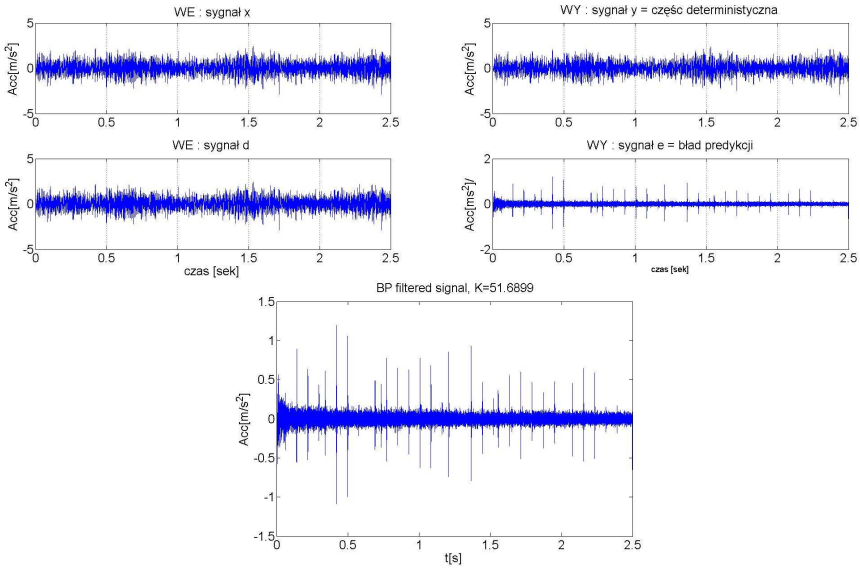
Rys. 14. Separacja sygnałów dla łożyska z wykorzystaniem filtracji adaptacyjnej
Fig. 14. Separation of signal from bearing housing by adaptive filtering



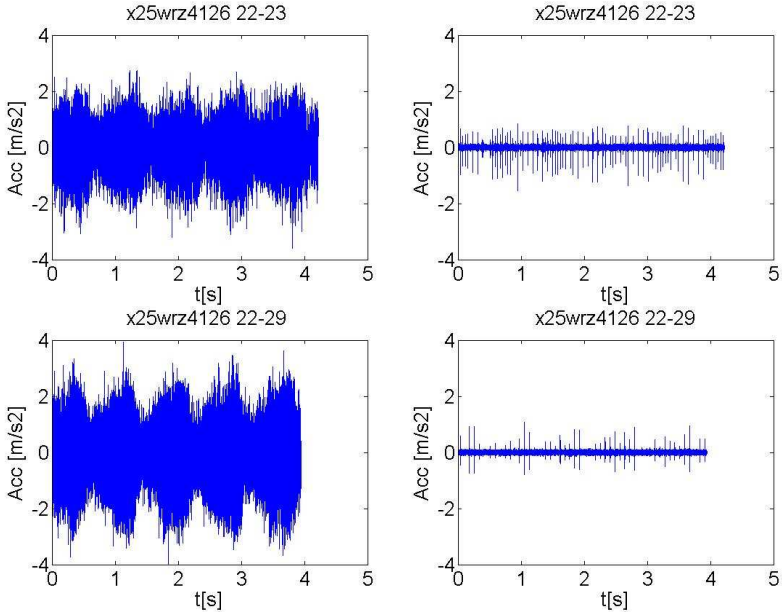
Rys. 15. Wyniki separacji dla sygnałów modelowych
Fig. 15. Result of separation for model of signals

5. PRZYKŁADOWE WYNIKI DLA OBIEKTÓW RZECZYWISTYCH – SEPARACJA DLA SYGNAŁÓW Z BĘBNÓW

Na rysunku 16 przedstawiono przykładowe wyniki filtracji adaptacyjnej dla sygnałów drganiowych zarejestrowanych na bębnach napędowych przenośnika taśmowego, przedstawia on również wyniki dla sygnału analizowanego w rozdziale 3.



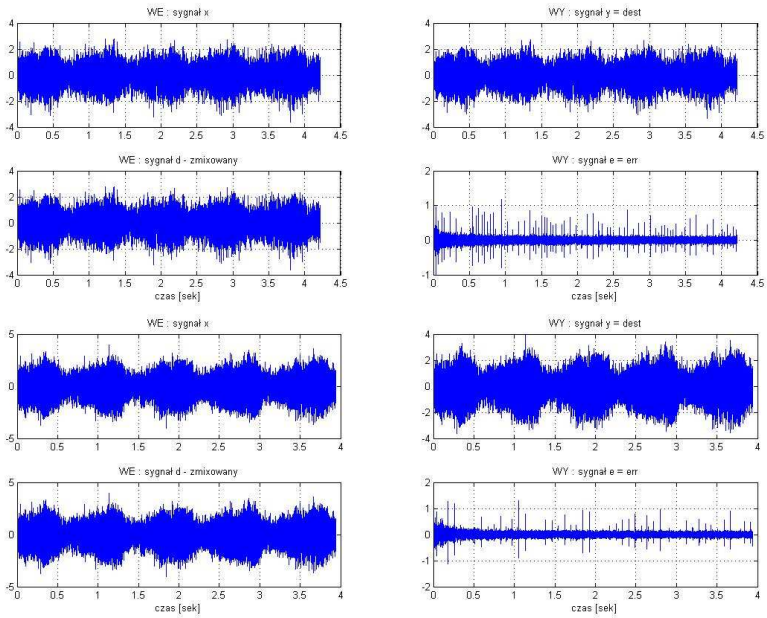
Rys. 16. Wyniki separacji dla sygnałów z bębna
Fig. 16. Result of separation for signals from pulley



Rys. 17. Sygnał oryginalny I odfiltrowany w oparciu o analizę struktury częstotliwościowej spektrogramu
Fig. 17.Original signal and bandpass filtrered signal based on spectrogram analysis

Jak już wspomniano w sygnale wejściowym jakiekolwiek zaburzenia impulsowe są niewidoczne, sygnał informacyjny jest maskowany przez deterministyczne składowe generowane przez zazębienie. Po filtracji sygnał $\varepsilon(k)$ zawierający informację o szkodzeniu jest bardzo impulsowy, impulsy powtarzają się cyklicznie. Wartość kurtozy jest bardzo wysoka, analiza widma obwiedni potwierdza, że częstotliwość modulująca jest taka sama jak opisano w rozdziale 3.

Na kolejnych rysunkach pokazano inne przykłady sygnałów z bębna, które zarejestrowane w różnych warunkach eksploatacyjnych i dla innego czasu życia niż przykład z rozdziału 3.



Rys. 18. Sygnały: wejściowe i wyjściowe (po filtracji)
Fig. 18. Input (original) signals and output signals (after filtering)

W obu przypadkach separacja zakończyła się pomyślnie, sygnał informacyjny jest czytelny.

6. WNIOSKI

W pracy zastosowano metodę adaptacyjnej filtracji sygnałów wykorzystującą elementy liniowej predykcji do separacji sygnałów informacyjnego i zakłócającego rejestrowanych na łożyskach w bębnach napędowych przenośnika taśmowego. Zastosowanie metody pozwala wyodrębnić sygnał informacyjny z uszkodzonego łożyska o

niewielkich w porównaniu do sygnału oryginalnego amplitudach i impulsowym charakterze, co jest typową oznaką uszkodzenia lokalnego.

LITERATURA

[1] RADKOWSKI S., *Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych* Wyd ITE Radom 2002.

[2] RANDALL R.B., *Detection and diagnosis of incipient bearing failure in helicopter gearboxes* Engineering Failure Analysis 11 (2004) 177–190.

[3] Ho D., RANDALL R.B. *Optimization of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals* Mechanical Systems and Signal Processing (2000), 14(5), 763–788.

[4] ANTONI J., RANDALL R.B., *Differential diagnosis of gear and bearing faults*, ASME Journal of Vibration and Acoustics 124 (2) (2002) 165–171.

[5] ANTONI J., RANDALL R.B., *Unsupervised noise cancellation for vibration signals. Part I—evaluation of adaptive algorithms*, Mechanical Systems and Signal Processing (2003) 89–101.

[6] BARTELMUS W., ZIMROZ R., ZAJDA P., *Detekcja lokalnych uszkodzeń w łożyskach bębnów napędowych przenośników taśmowych*. Transport Przemysłowy. 2006 nr 1, s. 32–38,. 2006.

[7] BARTELMUS W., ZIMROZ R., HRYNISZYN S., *Diagnostyka uszkodzeń lokalnych na podstawie sygnału drgań w maszynach górniczych*. Górnictwo Odkrywkowe. 47, nr 4/5, s. 22–31,.2005.

[8] BARTELMUS W., ZIMROZ R., *Optymalny zakres częstotliwości w procedurze demodulacji amplitudy w zastosowaniu do uszkodzeń lokalnych*. Diagnostyka (Warszawa). 2006 nr 1, s. 141–150, 2006.

[9] ZIMROZ R., *Optymalizacja wyboru szerokości pasma w demodulacji sygnału do wykrywania uszkodzeń lokalnych w elementach maszyn górniczych*. Transport Przemysłowy. 2006 nr 4, s. 67–73.

[10] ZIMROZ R., *Optymalizacja procedury demodulacji z wykorzystaniem unormowanej sumy amplitud wstęg bocznych jako kryterium decyzyjne*. Górnictwo i geologia IX. Wrocław: Oficyna Wydaw. PWr., 2007 s. 151–161,.2007.

[11] BARTELMUS W., ZIMROZ R., *Ekstrakcja sygnału informacyjnego na potrzeby wykrywania uszkodzeń lokalnych*. Górnictwo Odkrywkowe. 2007, 49, nr 3/4, s. 181–190.

[12] BOUSTANY R., *Séparation Aveugle à l'Ordre Deux de Sources Cyclostationnaires*: application aux Mesures Vibroacoustiques PhD Thesis, UTC Compiegne, 2005.

[13] HAYKIN S., *Adaptive Filter Theory*, Prentice–Hall, New Jersey, 1996.

[14] WIDROW B., Stearns S., 1985 Adaptive Signal Processing,. Englewood Clis NJ: Prentice–Hall pp. 349–351.

[15] ZIELIŃSKI T., *Cyfrowe Przetwarzanie sygnałów – od teorii do zastosowań*, WKŁ Warszawa 2005

[16] BARTELMUS W., BOUSTANY R., ZIMROZ R., ANTONI J., *Applications on spectral correlation techniques on mining machine signals: identification of faulty components*. The Second World Congress on Engineering Asset management and the Fourth International Conference on Condition Monitoring. WCEAM CM 2007, Harrogate, UK, 11–14 June 2007. Oxford: Coxmoor Publ., 2007, pp. 267–276.

[17] BOUSTANY R., BARTELMUS W., ANTONI J., ZIMROZ R., *Application of spectral correlation techniques of mining machine signals: extraction of fault signatures*. The Second World Congress on Engineering Asset management and the Fourth International Conference on Condition Monitoring. WCEAM CM 2007, Harrogate, UK, 11–14 June 2007. Oxford: Coxmoor Publ., 2007. pp. 320–326.

EXTRACTION OF SIGNAL OF INTEREST FOR BEARINGS DIAGNOSTICS USED IN BELT CONVEYOR PULLEYS BY ADAPTIVE FILTERING AND LINEAR PREDICTION

The paper deals with local fault detection procedure for bearings used in pulleys from driving unit in belt conveyor systems. Due to design factors and different nature of signals generated by elements of driving units diagnostic signals measured from bearing's housing are corrupted by signal generated by last stage of gearbox driving the pulley. There is a need to separate signals from damaged bearing from signal produced by gearbox. Similar problem was formulated by Randall for high speed gearbox used in helicopters. As a one of possible solution linear prediction based adaptive filtering was used. Aim of this paper is to apply this approach. Reason to check it is that diagnosed object is characterized by different (than helicopter's gearboxes) dimensions, speed, frequencies etc. It should be noted that without separation obtaining proper diagnosis is very difficult.