

*demodulacja, optymalizacja,
diagnostyka, uszkodzenia lokalne*

Radosław ZIMROZ*

OPTYMALIZACJA PROCEDURY DEMODULACJI Z WYKORZYSTANIEM UNORMOWANEJ SUMY AMPLITUD WSTĘG BOCZNYCH JAKO KRYTERIUM DECYZYJNE

Praca stanowi kontynuację badań prowadzonych przez autora obejmujących problematykę wykrywania wczesnych faz uszkodzeń lokalnych w elementach maszyn górniczych obejmującą w szczególności aspekty przetwarzania diagnostycznych sygnałów drganiowych z wykorzystaniem procedury demodulacji amplitudy. Wykazano pewne wady kurtozy jako kryterium optymalizacji i zaproponowano nowe kryterium bazujące na wyznaczonej w dziedzinie częstotliwości (w widmie obwiedni) sumie amplitud składowych o częstotliwościach związanych z uszkodzeniem. Wstępne wyniki uzyskane w wyniku stosowania nowej metody są bardzo obiecujące – dzięki zmianie kryterium optymalizacji udało się wyeliminować przypadki związane z wystąpieniem impulsu o przypadkowym charakterze które powodują gwałtowny wzrost wartości kurtozy (suma amplitud wstęp bocznych jest na takie zakłócenie niewrażliwa). Metodę z powodzeniem zastosowano dla sygnałów z uszkodzonego łożyska oraz uszkodzonej przekładni

1. WPROWADZENIE

Uszkodzenia lokalne [8] w przekładni zębatej czy w łożysku tocznym powodują chwilowe zaburzenie sygnału drganiowego o charakterze impulsowym. Wykrywanie tego typu uszkodzenia może odbywać się na podstawie analizy „impulsowości” sygnału w dziedzinie czasu lub poprzez analizę amplitud składowych (nazywanych wstępami bocznymi) w o odpowiednich częstotliwościach w widmie obwiedni.

W ostatnich pracach Bartelmusa i Zimroza [2, 3, 4] dotyczących wykrywania uszkodzeń lokalnych w maszynach górniczych podkreślano konieczność

* Badawcze Laboratorium Diagnostyki i Wibroakustyki, Instytut Górnictwa Politechniki Wrocławskiej we Wrocławiu, pl. Teatralny 2, 50-051 Wrocław

optymalizowania procedury ekstrakcji cech diagnostycznych ze względu na duży poziom zakłóceń spowodowanych złożonością układu i specyfiką środowiska kopalni.

W procedurze optymalizacji przetwarzania wykorzystano metodę demodulacji amplitudy (analizę obwiedni), której dokonywano dla tzw. „optymalnego zakresu częstotliwości” tzn.: zakresu, w którym dla zadanego kryterium relacja informacja/zakłócenia jest optymalna. Jako kryterium optymalizacji przyjęto kurtozę dla odfiltrowanego w zadanym paśmie sygnału.

W pracy [7] wykazano pewne mankamenty kurtozy jako kryterium optymalizacji. W ramach niniejszej pracy zaproponowano nowe kryterium, bazujące na zaproponowanej przez Gelmana [5] nowej cesze diagnostycznej będącej sumą amplitud wstęg bocznych w widmie obwiedni (ang. *sum of sidebands*) ale w unormowanej postaci.

2. IDEA OPTYMALIZACJI W ANALIZIE OBWIEDNI

Procedura demodulacji amplitudy jest jedną z najprostszych i jedną z najpopularniejszych technik przetwarzania sygnałów umożliwiającą detekcję uszkodzeń lokalnych. Idea demodulacji polega na wybraniu odpowiedniego zakresu częstotliwości, dokonania filtracji pasmowo-przepustowej dla tego pasma a następnie wykorzystaniu transformaty Hilberta do wyznaczenia obwiedni (sygnału modulującego będącego nośnikiem informacji o uszkodzeniu)[6, 9].

Koncepcja optymalizacji procedury wyniknęła z analiz map czasowo-częstotliwościowych sygnałów z przekładni i łożysk, z których wynika, że zakres częstotliwości w którym efekty modulacyjne (szerokopasmowe zaburzenia widma) znajdują się w różnych pasmach w zależności od cech konstrukcyjnych obiektu i warunków eksploatacyjnych w jakich pracuje przekładnia [1].

Kryterium zostało zdefiniowane następująco:

$$FC(f_L, f_U) = \max \left(\text{kurtosis} \left(F_{f_L}^{f_U} (S(t)) \right) \right) \quad (1)$$

gdzie:

- FC – funkcja celu w procedurze optymalizacji polegającej na poszukiwaniu częstotliwości granicznych filtru pasmowo-przepustowego, który zapewni maksymalną wartość kurtozy dla przetworzonego sygnału,
- $S(t)$ – nieprzetworzony sygnał drganiowy.
- f_L, f_U – odpowiednio dolna i górna częstotliwość graniczna filtru pasmowo-przepustowego,

- $F_{f_L}^{f_U}$ – operator filtracji w zakresie f_L, f_U ,
- kurtosis – kurtoza.

Kurtoza jest parametrem statystycznym procesu (np. drganiowego) opisana zależnością:

$$k = \frac{E(x-u)^4}{\sigma^2} \quad (2)$$

gdzie: x – zmienna losowa, u – wartość średnia, σ – odchylenie standardowe, E – estymator wartości oczekiwanej.

Opracowany algorytm można zapisać następująco:

```

for  $f_D = f_{min}$  to  $f_{max}$ 
  for  $f_G = f_D$  to  $f_{max}$ 
     $S = F_{f_D}^{f_G}$  (sygnał)
     $K(f_D, f_G) = kurtosis(S)$ 
  end
end
end

```

2.1. WADY KRYTERIUM OPARTEGO NA KURTOZIE

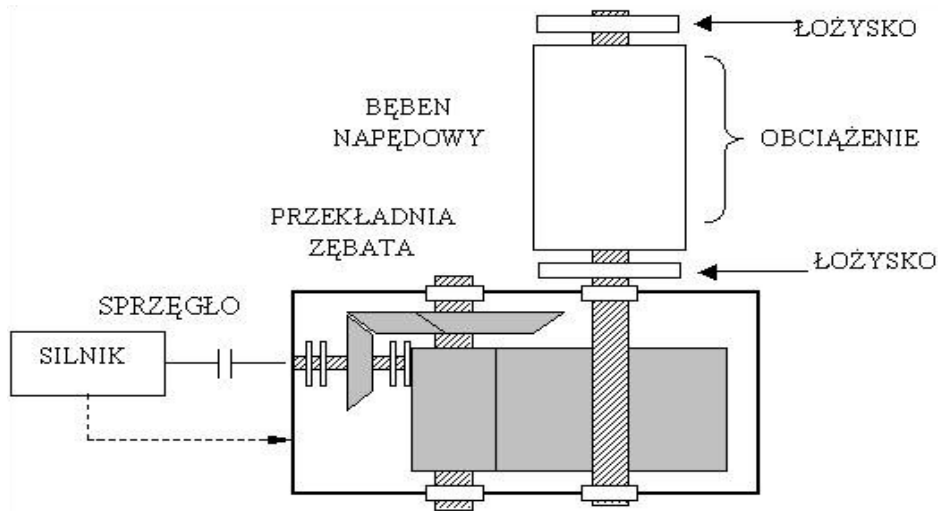
Niestety, jak już wspomniano, dla wielostopniowych przekładni stosowanych w warunkach kopalni odkrywkowej w złożonych systemach maszynowych (jak np. układ napędowy przenośnika) mogą występować różnego rodzaju zakłócenia utrudniające wnioskowanie. Zakłócenia te mogą mieć charakter deterministyczny (sygnał o określonym paśmie wynikający z przenoszenia drgań np. z drugiego stopnia przekładni na obudowę łożyska bębna) [3], które można wyeliminować poprzez opisane powyżej przyjęte kryterium, a także charakter impulsowy, gdzie impuls nie jest związany z uszkodzeniem (może to być krótkotrwałe przypadkowe wymuszenie pochodzące z innego obiektu). Prawdopodobnie taka sytuacja miała miejsce w przypadku analizowanego sygnału dla którego wyniki przedstawiono na rys 2b, 3 i 4d.

Warto zauważyć że sygnał zarejestrowany w punkcie p4 (opis punktów pomiarowych można znaleźć w [1]) na przekładni zębatej zawiera 2 lokalne maksima związane z dwoma rezonansami, natomiast sygnał zarejestrowany w punkcie p2 zawiera 3 lokalne maksima, przy czym jedno z nich przyjmuje wartość kilkadziesiąt razy większą od pozostałych dwóch (rys. 2). Analiza przebiegu czasowego, odfiltrowanego w zakresie ustalonym w wyniku zastosowania procedury optymalizacyjnej wyraźnie pokazuje przypadkowy charakter impulsu (rys. 4d).

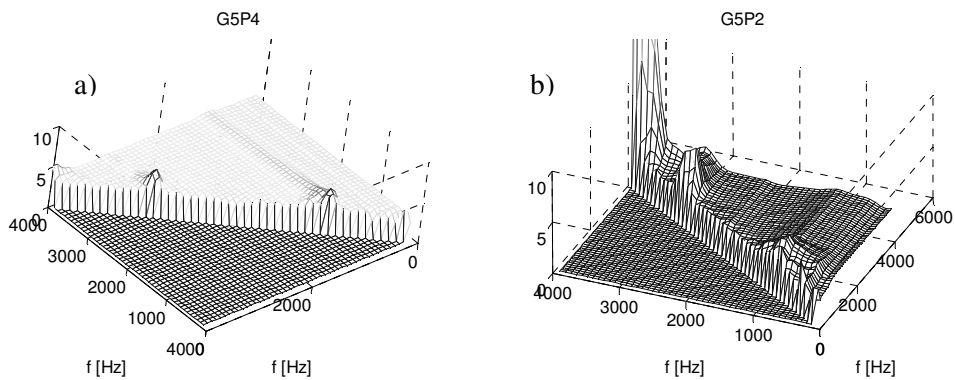
Okazuje się, że kurtoza jest niewrażliwa na okresowość impulsów. Kurtoza jest miarą koncentracji rozkładu i opisuje zmiany rozkładu powstałe w wyniku pojawienia

się wartości procesu o skrajnie małych lub dużych amplitudach.

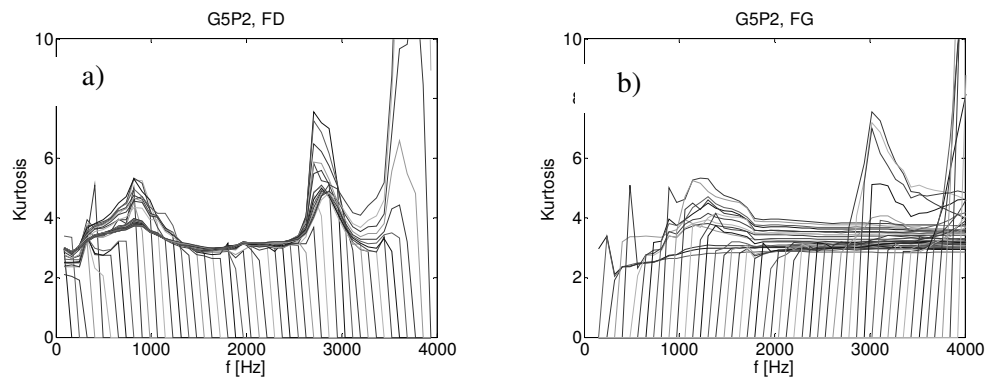
Im wyższa jest wartość współczynnika, tym krzywa liczebności jest bardziej wysmukła - w związku z tym jest większa koncentracja wartości chwilowych procesu wokół średniej. Natomiast małe wartości kurtozy wskazują na spłaszczenie rozkładu (rys. 5). Jeżeli impulsy mają incydentalny charakter (rys. 5b) skupienie wokół średniej jest duże bo tylko kilka amplitud (impulsy) wyraźnie odstaje od średniej.



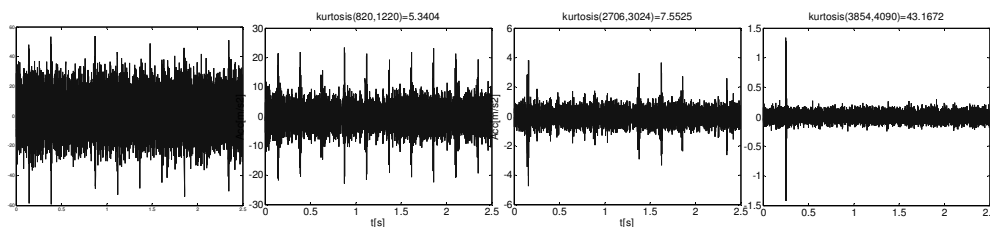
Rys. 1. Schemat układu napędowego przenośnika taśmowego
Fig. 1. Scheme of belt conveyor's driving system



Rys. 2. Mapy rozkładu kurtozy dla różnych punktów pomiarowych
Fig. 2. Two-dimensional distribution of kurtosis for different measurement points

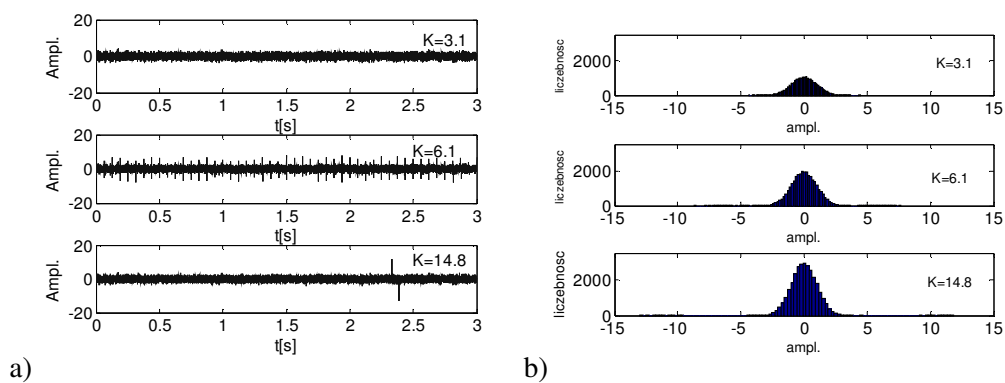


Rys. 3. Rozkłady kurtozy względem częstotliwości: a) dolnej b) górnej
 Fig. 3. Distribution of kurtosis for: a) lower frequency b) upper frequency



Rys. 4. Sygnał (przyspieszenia drgań) oryginalny i sygnały odfiltrowane w zidentyfikowanych zakresach częstotliwości

Fig. 4. Original and band-pass filtered signals (acceleration) in identified frequency ranges



Rys. 5. Sygnały syntetyczne i histogramy z wyznaczoną kurtozą: a) sygnał bez impulsów: $k=3,1$;
 b) impulsy związane z uszkodzeniem: $k=6,1$; c) przypadkowy impuls: $k=14,8$

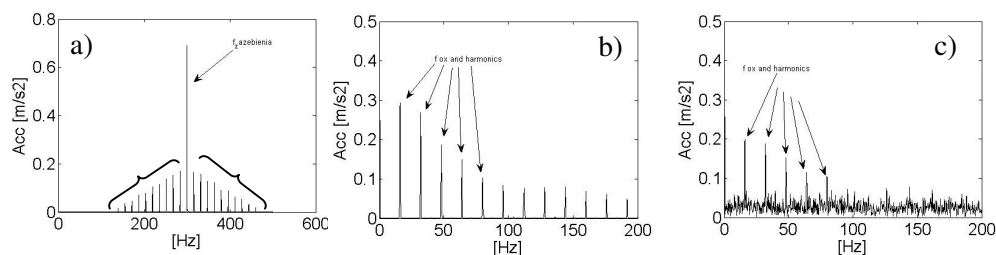
Fig. 5. Synthetic signals and histograms with value of kurtosis: a) no impulses $k=3.1$
 b) fault related impulses $k=6.1$ c) accidental impulse $k=14.8$

2.2. NOWE KRYTERIUM OPTIMALIZACJI

Kurtoza jest jednym z parametrów który można wykorzystać do detekcji uszkodzenia na podstawie analizy sygnału w dziedzinie czasu. Wykazane powyżej własności kurtozy dla tak sformułowanego problemu nie dają stuprocentowej pewności trafności diagnozy na podstawie maksymalizacji kurtozy wyznaczanej dla sygnału odfiltrowanego w paśmie f_D-f_G .

Innym możliwym kryterium może być zaproponowana przez Gelmana [5] nowa cecha diagnostyczna wyznaczana w dziedzinie częstotliwości mianowicie suma amplitud składowych w widmie obwiedni o częstotliwości uszkodzenia i jej N harmonicznych (w skrócie suma wstęp bocznych) (rys. 6).

Amplitudy wyższych harmonicznych ze względu na malejącą amplitudę oraz poziom zakłóceń mogą być trudno wykrywalne. Wydaje się zatem konieczne arbitralne ograniczanie analizowanego zakresu (rys. 6c).



Rys. 6. Idea procedury demodulacji i ekstrakcji nowej cechy diagnostycznej:

- a) fragment widma z widoczną częstotliwością nośną i wstęgami bocznymi; b) widmo obwiedni sygnału bez zakłóceń; c) widmo obwiedni sygnału w obecności zakłóceń typu szumowego

Fig. 6. Idea of demodulation procedure and extraction of new diagnostic feature:

- a) part of spectrum with carrier and sidebands frequencies; b) envelope spectrum without interference; c) envelope spectrum with interference (wideband noise)

Wyniki badań nad nowym kryterium pokazały, że wraz ze wzrostem analizowanych częstotliwości wartości amplitud składowych maleją (chyba, że składowe znajdują się w obszarze rezonansu np. zazębienia) co w procesie optymalizacji praktycznie dyskwalifikuje to kryterium.

W procesie detekcji uszkodzenia nie jest ważna bezwzględna wartość cechy ale możliwość jej wykrywania w obecności zakłóceń (typu losowego lub deterministycznego). Unormowana wartość proponowanej cechy może zostać z powodzeniem wykorzystana w procesie poszukiwania optymalnego zakresu częstotliwości.

Normalizacja polega w tym przypadku na wyznaczeniu procentowego udziału sumy amplitud sygnału informacyjnego reprezentowanego przez składowe o częstotliwości uszkodzeń:

$$S\text{-of-S NORM} = S\text{-of-S/E}$$

gdzie:

- S-of-S NORM – wartość unormowanej cechy diagnostycznej,
- S-of-S – energia sygnału informacyjnego w analizowanym paśmie,
- E – suma wszystkich składowych z widma sygnału w analizowanym paśmie.

Procedura wyznaczania unormowanej wartości cechy jest następująca:

- filtracja sygnału w zadanym paśmie,
- wyznaczenie widma obwiedni odfiltrowanego sygnału,
- detekcja N składowych o częstotliwości f_u (częst. uszkodzenia) i jej harmonicznym,
- wyznaczenie sumy amplitud składowych,
- wyznaczenie sumy wszystkich składowych w zakresie $N \cdot f_u$,
- wyznaczenie S-of-S NORM.

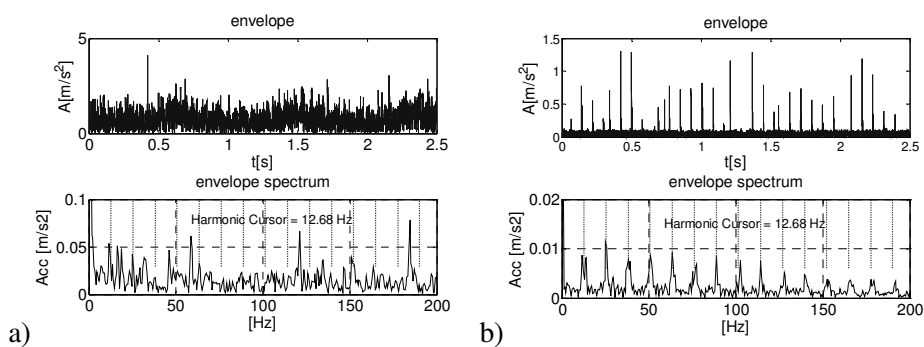
Uwzględniając nowe kryterium algorytm można zapisać następująco:

```

for  $f_D = f_{min}$  to  $f_{max}$ 
  for  $f_G = f_D$  to  $f_{max}$ 
     $S = F_{f_D}^{f_G}$  (sygnał)
    % feature extraction
    S-of-S ( $f_D, f_G$ ) = sum(detected_harmonics(spectrum(envelope(S))))
    % feature normalisation
    S-of-S ( $f_D, f_G$ ) = S-of-S ( $f_D, f_G$ ) / sum((spectrum(envelope(S))))
  end
end
end

```

3. WYNIKI PROCEDURY OPTIMALIZACYJNEJ Z WYKORZYSTANIEM NOWEGO KRYTERIUM



Rys. 7. Wynik analizy sygnału z uszkodzonego łożyska:

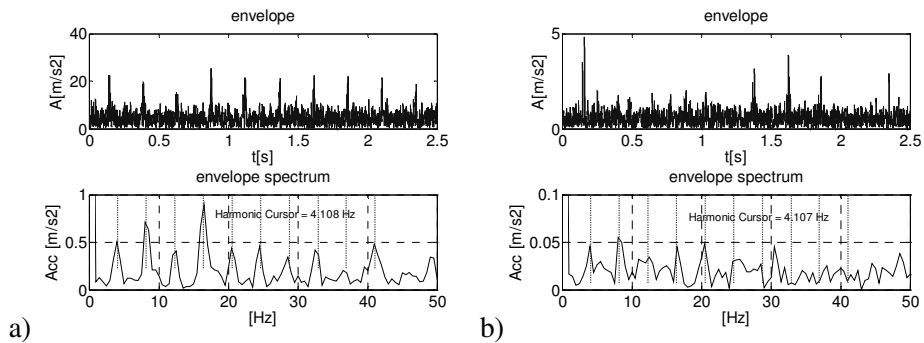
a) obwiednia i widmo bez optymalizacji, b) obwiednia i widmo po filtracji optymalnej

Fig. 7. Results for signal from damaged bearing: a) envelope and its spectrum without optimization;

b) envelope and its spectrum after optimal processing

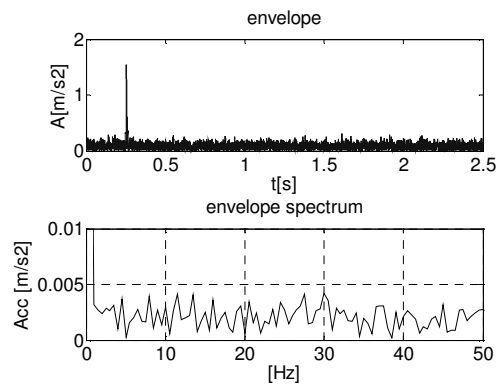
Na rys. 7 pokazano obwiednię i widmo obwiedni dla sygnału z łożyska bębna napędowego. Rysunek 7a przedstawia wynik analizy dla sygnału oryginalnego, a rysunek 7b dla optymalnie przetworzonego zgodnie z zaproponowanym algorytmem.

Widoczne są wyraźne różnice w poziomach amplitud – porównanie nienormalizowanych wartości cech diagnostycznych dyskredytowałoby wyniki z rys 7b. Wybór wyniku z rys 7a byłby błędny – struktura widma obwiedni jest bardzo skomplikowana, obecność zakłóceń o dużych amplitudach przy jednoczesnej małej liczbie wykrytych składowych o częstotliwości uszkodzenia i jej harmonicznym pokazuje jak istotna jest normalizacja cech. Widmo obwiedni z rys 7b pozwala jednoznacznie zidentyfikować składowe informacyjne a udział energii sygnału informacyjnego odniesiony do całkowitej energii jest znaczący.



Rys. 8. Wyniki analizy obwiedni (obwiednia i jej widmo) dla sygnałów odfiltrowanych w zakresach: a) $df = (820-1220)$ Hz; b) $df = (2706-3024)$ Hz

Fig. 8. Results of envelope analysis (envelope and its spectrum) for band-pass filtered signals at frequency ranges: a) $df = (820-1220)$ Hz; b) $df = (2706-3024)$ Hz

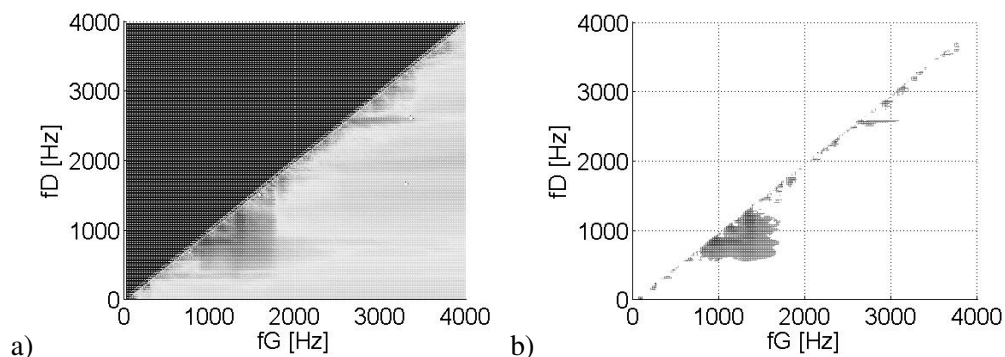


Rys. 9. Wyniki analizy obwiedni (obwiednia i jej widmo) dla sygnału odfiltrowanego w zakresie $df = (3854-4090)$ Hz

Fig. 9. Results of envelope analysis (envelope and its spectrum) for band-pass filtered signals at frequency range: $\Delta f = (3854-4090)$ Hz

Rysunki 8 a,b oraz rysunek 9 przedstawiają wyniki analizy obwiedni (obwiednia i jej widmo) dla sygnałów odfiltrowanych w zakresach uzyskanych z procedury opartej na optymalizacji przetwarzania z użyciem kurtozy (zob. rys. 4b-d).

Na rysunku 8a identyfikacja składowych informacyjnych jest jednoznaczna, na rysunku 8b utrudniona ale ciągle możliwa, natomiast widmo obwiedni z rysunku 9 nie jest użyteczne diagnostycznie – nie jest możliwe wykrycie uszkodzenia na podstawie wyniku tej analizy. W porównaniu do wyników uzyskanych w pracy [7] uzyskano znaczną poprawę.



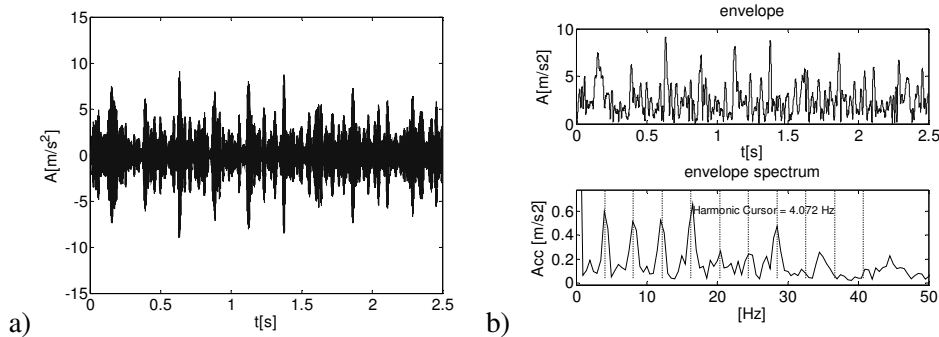
Rys. 10 Wynik procedury optymalizacyjnej dla nowego kryterium:

- a) rozkład nowej cechy w funkcji częstotliwości filtra pasmowo-przepustowego,
- b) wizualizacja rozkładu cechy z ustawionym progiem wyświetlania

Fig. 10. Result of optimisation procedure with a new criterion: a) two-dimensional distribution of feature; b) two-dimensional distribution of feature with threshold of visualization

Ostateczny wynik procedury demodulacyjnej z zastosowaniem nowego kryterium optymalizacyjnego przedstawiono na rys. 10. Przedstawia on rozkład cechy diagnostycznej w funkcji częstotliwości granicznych filtra. Mapa ta jest symetryczna zatem wyznaczana i prezentowana jest tylko macierz trójkątna (poniżej przekątnej).

W celu ułatwienia interpretacji na rys. 10b zaprezentowano ten sam wykres ale z ustalonym arbitralnie progiem wyświetlania. Jednoznacznie najlepszy wynik uzyskano w zakresie częstotliwości $f_D = (800-1200)$, $f_G = (800-1500)$. Wyznaczenie współrzędnych lokalnego maksimum pozwoliło wyznaczyć optymalne częstotliwości graniczne filtra które wynoszą odpowiednio $f_D = 860$, $f_G = 930$. Rysunek 11a i b przedstawia odpowiednio sygnał przefiltrowany w optymalnym zakresie oraz jego obwiednie i widmo obwiedni.



Rys. 11. Wynik procedury optymalizacyjnej dla nowego kryterium: a) sygnał przefiltrowany w optymalnym zakresie b) obwiednia i widmo obwiedni sygnału optymalnie przetworzonego
 Fig. 11 Result of optimising procedure for new criterion: a) band-pass filtered signal at optimal frequency range; b) envelope and its spectrum for obtained signal

4. PODSUMOWANIE

Praca stanowi kontynuację badań prowadzonych przez autora obejmujących problematykę wykrywania wczesnych faz uszkodzeń lokalnych w elementach maszyn górniczych (przekładnie zębate, łożysk bębnow napędowych stosowanych w przenośnikach taśmowych) obejmującą w szczególności aspekty przetwarzania diagnostycznych sygnałów drganiowych z wykorzystaniem procedury demodulacji amplitudy. Wykazano pewne wady kurtozy jako kryterium optymalizacji i zaproponowano nowe kryterium bazujące na wyznaczonej w dziedzinie częstotliwości (w widmie obwiedni) sumie amplitud składowych o częstotliwościach związanych z uszkodzeniem. Wstępne wyniki uzyskane w wyniku stosowania nowej metody są bardzo obiecujące – dzięki zmianie kryterium optymalizacji udało się wyeliminować fałszywy alarm związany z wystąpieniem przypadkowego impulsu (duży wpływ na wartość kurtozy – suma amplitud wstęp bocznych jest na takie zakłócenie niewrażliwa). Metodę z powodzeniem zastosowano dla sygnałów z uszkodzonego łożyska oraz uszkodzonej przekładni

LITERATURA

- [1] BARTELMUS W., *Diagnostyka Maszyn Górniczych* [w:] Górnictwo Odkrywkowe, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1998.
- [2] BARTELMUS W., ZIMROZ R., *Optymalny zakres częstotliwości w procedurze demodulacji amplitudy w zastosowaniu do uszkodzeń lokalnych*, Diagnostyka 1(37)/2006.
- [3] BARTELMUS W., ZIMROZ R., ZAJDA P., *Detekcja lokalnych uszkodzeń w łożyskach bębnow napędowych przenośników taśmowych*, Transport Przemysłowy 1(23)/2006.

- [4] BARTELMUS W., ZIMROZ R. Hryniszyn S., *Diagnostyka uszkodzeń lokalnych na podstawie sygnału drgań w maszynach górniczych*, Górnictwo Odkrywkowe 4–5/2005.
- [5] GELMAN L. ZIMROZ R. BIRKEL J., WHITEHURST G., LEIGH-FIRBANK H., SIMMS D., WATERLAND B., *Adaptive vibration condition monitoring technology for local tooth damage in gearboxes*, Conference on Condition Monitoring, King's College, Cambridge 2005.
- [6] RADKOWSKI S., *Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych*, Wydawnictwo ITE, Radom 2002.
- [7] ZIMROZ R., *Optymalizacja wyboru szerokości pasma w demodulacji sygnału do wykrywania uszkodzeń lokalnych w elementach maszyn górniczych*, Transport Przemysłowy, grudzień 2006 (w druku).
- [8] BARTELMUS W., *Gearbox Diagnostic Fault Detection*, Maintenance Resources.com On-line Magazine, September 2003, www.maintenanceresources.com/referencelibrary/ezine/Sep03v37.htm.
- [9] RANDALL R.B., *A new method of modelling gear faults*, Journal of Mechanical Design 104, 1982, 259–267.

OPTIMIZATION OF ENVELOPE ANALYSIS WITH NORMALISED SUM OF SIDE BANDS AS A DECISION CRITERION

Paper deals with investigation regarding optimisation of local fault detection problems in mining machines. Detection procedures based on vibration signal processing – envelope analysis in this case. It has been shown that kurtosis based criterion for some reasons give false alarms so a new criterion – so called normalised sum of sidebands has been proposed. Initial results have been very promising – a false alarm case has been eliminated. Proposed technique has been tested for bearing and gearbox signals.