

OPTYMALNY ZAKRES CZĘSTOTLIWOŚCI W PROCEDURZE DEMODULACJI AMPLITUDY W ZASTOSOWANIU DO USZKODZEŃ LOKALNYCH

Walter BARTELMUS, Radosław ZIMROZ

Badawcze Laboratorium Diagnostyki i Wibroakustyki

Pl. Teatralny 2, 50-051 Wrocław {walter.bartelmus, radoslaw.zimroz}@pwr.wroc.pl

Streszczenie

W pracy podjęto problematykę wykrywania uszkodzeń lokalnych z wykorzystaniem procedury demodulacyjnej. Wykazano istotność doboru pasma użytego w demodulacji zarówno w sensie jego położenia jak i szerokości. Zaproponowano obiektywne kryterium oparte na kurtozie umożliwiające porównanie wyników demodulacji dla różnych zakresów częstotliwości. Zaproponowano procedurę wykorzystującą opracowane kryterium do wyszukiwania optymalnego (w sensie maksymalnej kurtozy) zakresu częstotliwościowego. Wykazano na przykładach użyteczność zaproponowanej metody.

Słowa kluczowe: uszkodzenia lokalne, demodulacja, optymalna filtracja.

OPTIMAL FREQUENCY RANGE FOR AMPLITUDE DEMODULATION FOR LOCAL FAULT DETECTION

Summary

In the paper is undertaken the problem of local faults detection when using demodulation procedures. It has been shown that the choice of a signal filtration frequency scope and its place is crucial for demodulation process. It has been suggested the objective criteria of the scope and place choice of signal filtration frequency. The criterion is based on filtered signal kurtosis value comparison. It has been given the procedure for optimised frequency scope and place for signal demodulation in the sense of maximum kurtosis value. Case studies have been presented to show usefulness of the proposed procedure for local fault detection.

Keywords: local fault, demodulation, optimal filtering.

1. WPROWADZENIE

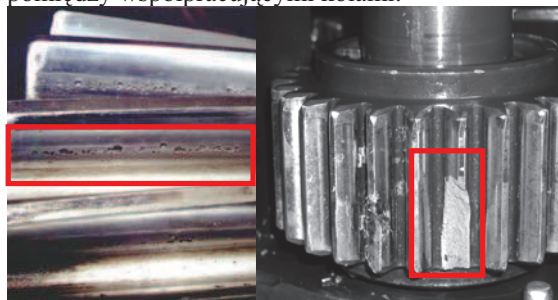
Metody wykrywania uszkodzenia lokalnego (np.: pęknięcie u podstawy zęba) to jedno z najbardziej istotnych zagadnień w diagnostyce. O ile w przypadku uszkodzeń rozłożonych (zużycie pitingiem, zacieraniem, ścieranie) czas pomiędzy diagnozą stwierdzającą określony poziom zużycia a maksymalnym czasem życia zużywającego się elementu może sięgać nawet kilkunastu miesięcy (oczywiście zależy to od warunków eksploatacyjnych) o tyle uszkodzenie lokalne może w krótkim czasie doprowadzić do kompletnego zniszczenia obiektu (rys.1), jeśli złamana część zęba dostanie się między współpracujące zęby. W przekładniach zębatych proces inicjacji i dalszej propagacji zmęczeniowego pęknięcia zęba u podstawy aż do wyłamania jest ciągle przedmiotem badań wiodących ośrodków w kraju i za granicą. Niezwykle istotna wydaje się kwestia rozróżniania (a więc diagnozowania) typu uszkodzenia lokalnego. Pęknięcie zęba u podstawy a uszkodzenie powierzchni zęba to ciągle ta sama klasa uszkodzeń lokalnych, ale czas potrzebny do rozwinięcia uszkodzenia do krytycznego stadium jest zupełnie inny. Zagadnienie rozpoznawania

rodzaju uszkodzeń lokalnych wykracza poza zakres tej pracy. Zdaniem autorów rozpoznawanie rodzaju uszkodzenia lokalnego powinno stanowić kolejny etap procesu – najpierw należy wykryć istnienie uszkodzenia lokalnego i temu przede wszystkim dedykowana jest ta praca. Brak monitorowania stanu przekładni z uwzględnieniem wczesnego wykrywania uszkodzeń lokalnych może skutkować efektami jak na rys. 1.



Rys. 1. Widok zniszczonego koła zębatego o efekcie wystąpienia uszkodzenia lokalnego

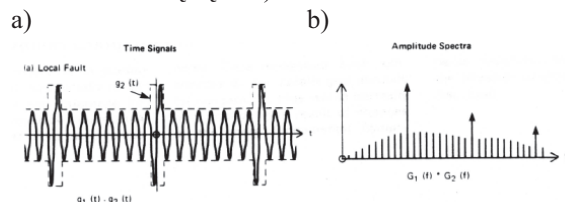
Brak monitorowania stanu doprowadził do sytuacji, w której uszkodzenie osiągnęło fazę krytyczną: doszło bądź to do wyłamania jednego z zębów lub uszkodzenia łożyska i w konsekwencji fragment zęba lub element toczny znalazł się pomiędzy współpracującymi kołami.



Rys. 2. Wczesne formy pittingu i wykruszenie zęba

Autorom znanych jest wiele prac poświęconych wykrywaniu uszkodzeń lokalnych z wykorzystaniem metod w dziedzinie czasu, częstotliwości, metod czasowo-częstotliwościowych, cepstrum czy wreszcie procedur demodulacyjnych.

Większość metod bazuje na teorii, że uszkodzenie lokalne powoduje chwilowe zaburzenie dynamiki systemu powodując modulację amplitudową i fazową sygnału generowanego przez obiekt okresowym sygnałem impulsowym o niewielkiej energii (zwykle sygnałem modulującym jest sygnał wolnozmienny – np. związany z obrotami wału a sygnał pełniący rolę częstotliwości nośnej jest związany z częstotliwością zazębienia „z” razy wyższą niż modulująca – gdzie z – oznacza liczbę zębów).

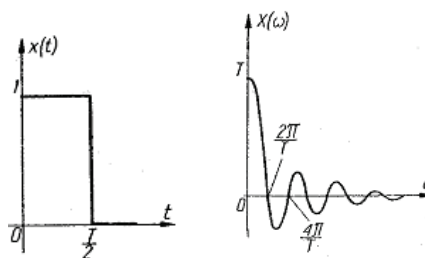


Rys. 3. Lokalne uszkodzenia

- a) chwilowe okresowe zaburzenie sygnału,
b) widmo sygnału z rys a) [1]

Badanie struktury częstotliwościowej z wykorzystaniem metod widmowych [1] pokazuje szerokopasmowe zaburzenie widma, które „wypełnione” jest serią równooddalonych prążków, odległość między prążkami jest związana z czasem powtarzania impulsów w dziedzinie czasu (okresem impulsu T_{imp}) i wynosi $\Delta f = 1/T_{imp}$ [2].

Wykorzystanie metod czasowo-częstotliwościowych [3, 4] pokazuje pełniejszy obraz struktury sygnału – zaburzenie powoduje powstanie struktury jak na rys. 3 ale ma charakter chwilowy, cykliczny a cykl ten jest zgodny z okresem występowania impulsów w przebiegu czasowym.



Rys. 4. Ilustracja graficzna zależności pomiędzy czasem trwania impulsu a szerokością pasma

Wg Szabatina [5] sygnał o skończonym czasie trwania t_{imp} jest scharakteryzowany przez pasmo częstotliwości $\Delta F = 1/t_{imp}$. Okresowość impulsów powoduje, że w analizowanym paśmie częstotliwości występuje wspomniana wcześniej skończona liczba prążków oddalonych o Δf .

Dla przekładni planetarnych pracujących w układach napędowych w koparkach kołowych dodatkowo występuje problem związany ze zmiennością warunków eksploatacyjnych (manifestowanych przez zmienność obciążenia i prędkości) [6]. Fakt ten powoduje że metody analizy sygnałów (widmo, cepstrum, bispectrum) nie mogą mieć tu zastosowania. Niestacjonarność (a nawet nieokresowość sygnału) narzuca konieczność stosowania metod analizy dedykowanych dla sygnałów niestacjonarnych (analiza obwiedni, analizy czasowo-częstotliwościowe).

Ze względu na złożoność obliczeniową większości analiz czasowo-częstotliwościowych jedną z najpopularniejszych technik jest procedura demodulacji sygnałów. Pomimo wielu publikacji z tego zakresu autorom nie jest znana żadna praca odpowiadająca w sposób wyczerpujący na pytania:

- Jakie częstotliwości wybrać do demodulacji (wokół częstotliwości zazębienia czy rezonansu zazębienia, względem której harmonicznej);
- Jak szeroki zakres pasma przyjąć do demodulacji (zwykle jest to $\pm 0,5$ częstotliwości zazębienia).

Nie zdefiniowano jeszcze kryterium, które umożliwiłoby podjęcie racjonalnej, obiektywnej decyzji.

Opracowanie procedury doboru optymalnego (wg danego kryterium) zakresu w procedurze demodulacji jest celem tej pracy.

Należy dodać, że problem doboru szerokości pasma jest sygnalizowany w pracy [7].

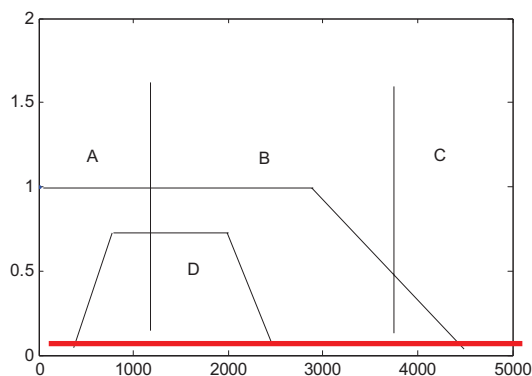
2. WYKORZYSTANIE PROCEDURY DEMODULACJI DO WYKRYWANIA USZKODZEŃ LOKALNYCH

Jak już wspomniano uszkodzenie lokalne powoduje impulsowe zaburzenie sygnału, co w dziedzinie częstotliwości powoduje zaburzenie struktury widma – zaburzenie to obejmuje określoną

szerokość pasma. Postulat o skończonej, niewielkiej energii sygnału związanego z uszkodzeniem i jej dystrybucji w funkcji częstotliwości jak to pokazano na rys. 3 i 4 powoduje, że badanie właściwości sygnału w całym zakresie częstotliwości – biorąc pod uwagę często występujący efekt nadpróbkowania sygnału – jest nieuzasadnione.

Co więcej, ze względu na zakłócenia typu szumowego zakres ΔF jest ograniczony z góry poziomem szumu maskującego sygnał zawierający informację o uszkodzeniu.

Idąc dalej należy zauważyć, że w praktyce eksploatacyjnej rejestrowany sygnał z dowolnego diagnozowanego obiektu jest narażony na zakłócenia o charakterze deterministycznym bądź losowym pochodzące z innych współpracujących (bądź niezależnych) obiektów (np. pozostałe stopnie w przekładni zębatej) [4, 22].



Rys. 5. Teoretyczny podział pasm dla widma sygnału drganiowego dla przekładni

Analizy widmowe i czasowo-częstotliwościowe sygnałów drganiowych z przekładni z uszkodzeniem lokalnym oraz wykorzystanie zidentyfikowanego modelu w połączeniu z wiedzą na temat parametrów impulsu generowanego przez uszkodzenie lokalne prowadzą do podziału pasma jak na rys. 5 [2]:

- zakres A - sygnał zdominowany przez zakłócenia (np. przez sygnał drganiowy z kolejnych stopni w przekładni);
- zakres B - sygnał zawierający użyteczną informację o uszkodzeniu;
- zakres C - sygnał pozbawiony informacji o uszkodzeniu (zdominowany przez szum).

W pewnych przypadkach dla przekładni z uszkodzeniem lokalnym dodatkowo mamy do czynienia ze wzmocnieniem składowych znajdujących się w zakresie częstotliwości odpowiadającemu rezonansowi ząbienia. Wzrost amplitud związany z rezonansem ząbienia jest dalece większy niż zmiana amplitud wynikająca z rezonansów i anty rezonansów struktury (obudowy przekładni). Dla rozwiązania tego problemu poszukiwany jest zakres D dla filtru pasmowo-przepustowego (rys. 5).

Analiza struktury widma dla sygnału z modelu [2, 8] pokazuje, że najbardziej użyteczna część sygnału dla badanej przekładni znajduje się

w zakresie wokół częstotliwości 1000Hz (dla zakresu częstotliwości 800-1200Hz) co odpowiada rezonansowi ząbienia.

Podobne wyniki świadczące o istnieniu pasm szczególnie informacyjnych diagnostycznie uzyskali inni autorzy [9, 10].

Tak szczegółowa analiza wpływu różnych czynników na postać sygnału jest tematyce blisko ważnego zagadnienia, które zapoczątkował Cempel, a rozwijali potem także inni autorzy (m.in. [7]), dotyczącego modelowania procesu powstawania sygnału rejestrowanego w punkcie odbioru sygnału znajdującego się zwykle na obudowie przekładni.

Biorąc pod uwagę, że źródła zakłóceń mogą być reprezentowane przez sygnały o skończonych pasmach częstotliwości, rejestrowany sygnał będzie zawierał pasma częstotliwości, w których stosunek informacji użytecznej do zakłóceń może być dalece niekorzystny (wg dowolnego obiektywnego kryterium).

Zatem zakres (lub zbiór stanowiący podzakresy) częstotliwości, który może odegrać pozytywną rolę w procesie diagnozowania jest ze względu na istnienie źródeł zakłócających znacznie ograniczony w zależności od złożoności systemu.

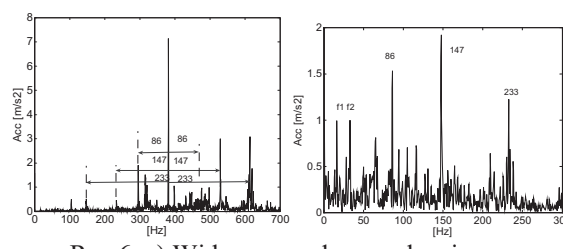
Wspomniane powyżej właściwości sygnału ograniczające zbiór stosowanych analiz dedykowanych sygnałom niestacjonarnym ukierunkowały autorów na analizę obwiedni oraz analizy czasowo-częstotliwościowe. Ze względu na stopień złożoności algorytmów tych ostatnich zdecydowano skoncentrować się na demodulacji.

Teoretyczne podstawy procedur demodulacyjnych można znaleźć w wielu publikacjach krajowych [11, 12, 7] i zagranicznych [1, 13, 14, 15, 16, 17, 18] zatem przytaczanie ich w tym artykule uznano za zbędne.

W tej części pracy zaprezentujemy przegląd technik z autorskimi przykładami i komentarzem pomijając matematyczne podstawy.

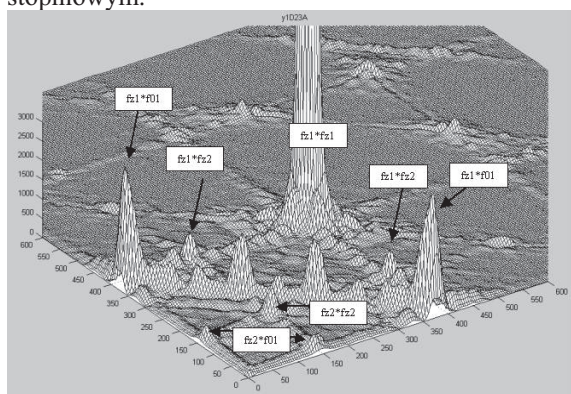
2.1. Demodulacja wokół częstotliwości ząbienia – wybór harmonicznej

Mączak [12] do demodulacji sugeruje wykorzystanie 1, 2 lub 3 harmonicznej. Bartelmus i Zimroz wykazali [19], że w wielostopniowych przekładniach zębatych wybór harmonicznej jest trudniejszy i przykładowo dla pierwszego stopnia powinny to być raczej wyższe harmoniczne ze względu na wpływ drugiego stopnia. Oczywiście ze względu na malejącą amplitudę wraz ze wzrostem numeru harmonicznej wykorzystanie wyższych harmonicznych jest często utrudnione.



Rys 6. a) Widmo sygnału symulacyjnego, b) widmo obwiedni dla sygnału symulacyjnego

Oddziaływanie między stopniami i efekty modulacyjne, które są spowodowane zmienną sztywnością ząbienia dającymi efekt nieliniowy ilustruje rys. 6. Oddziaływanie to powoduje modulację częstotliwości ząbienia pierwszego stopnia częstotliwością ząbienia stopnia drugiego. Takie interakcyjne zachowanie stopni przekładni powoduje znaczne skomplikowanie struktury częstotliwościowej. Więcej informacji o badaniu struktury częstotliwościowej w wielostopniowych przekładniach zębatych znaleźć można w innych pracach autorów gdzie przedstawiono wpływ czynników konstrukcyjnych [20, 21, 22] na sygnał drganiowy. Rys. 7 pokazuje bispektrum a w nim efekty nieliniowe spowodowane biciem pierwszego wału przekładni i oddziaływaniem między stopniowym.

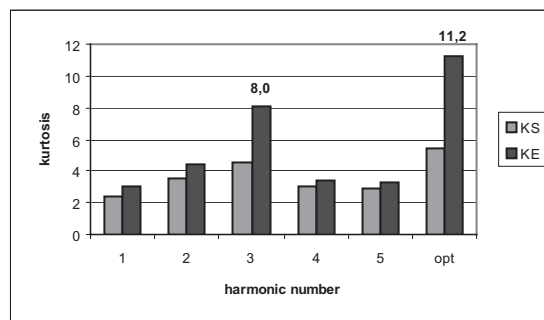


Rys. 7. Bispektrum sygnału drganiowego dla analizowanej przekładni

Wydaje się, że wybór harmonicznnej musi być kompromisem pomiędzy wielkością zakłóceń a amplitudą składowej nośnej. Inne podejście zaproponował Gelman [23]. Uważa on, że do demodulacji należy wykorzystać harmoniczną o największej znormalizowanej amplitudzie, co wiąże się z maksymalnym stosunkiem sygnału do szumu (SNR). Gelman twierdzi, że na wynik demodulacji ma wpływ nie tylko amplituda nośnej, ale także poziom zakłóceń. Kryterium maksymalnej amplitudy harmonicznnej ząbienia może nie być optymalne ze względu na wysoki poziom zakłóceń obecnych w danym zakresie częstotliwości.

Na rys. 8 pokazano porównanie wyników przetwarzania sygnału (kurtoza sygnału po filtracji KS oraz kurtoza sygnału po demodulacji KE) dla pięciu kolejnych harmonicznnych. Z rysunku łatwo zauważyć duże różnice pomiędzy harmonicznnymi (dwukrotne zwiększenie kurtozy dla trzeciej harmonicznnej). Na wykresie pokazano także (oznaczony jako opt) wynik przetwarzania w optymalnym zakresie częstotliwości (zob. roz. 3) (zakres związany jest z rezonansem ząbienia który wynika z wpływu czynników konstrukcyjnych na własności sygnału drganiowego [20, 21, 22]).

Ponieważ zakres ten (800-1200Hz) obejmuje 3 harmoniczną, dlatego dla tej harmonicznnej uzyskano najlepszy wynik.



Rys. 8. Wartości kurtozy dla harmonicznnych ząbienia dla przekładni z uszkodzeniem lokalnym KS – kurtoza po filtracji, KE- kurtoza obwiedni sygnału, opt – wartości kurtozy po optymalizacji (zob. pkt.3)

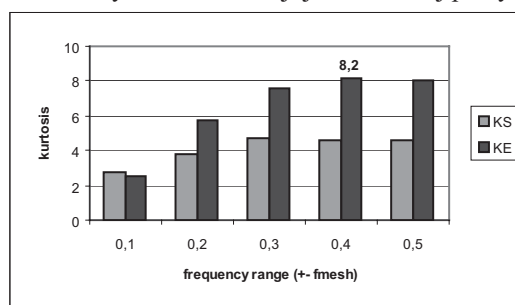
2.2. Demodulacja wokół częstotliwości ząbienia – wybór szerokości pasma

Oprócz kwestii selekcji nośnej w procesie demodulacji niezwykle istotny jest również odpowiedni dobór szerokości pasma użytego do demodulacji. Większość prac powołuje się na wyniki pracy [1], w której stwierdzono, że zakres ten powinien wynosić $\pm 0,5f_{\text{ząbienia}}$.

Wydaje się, że ze względu na różne parametry impulsu oraz obecność zakłóceń taka szerokość pasma może nie być optymalna.

Brie i Tomczak [16] wykazali, np. że szerokość pasma dla demodulacji AM jest inna niż FM - zagadnienie to wprawdzie wykracza poza ramy tej pracy, ale pokazuje konieczność adaptacyjnego doboru pasma.

Badanie jaki jest wpływ doboru szerokości pasma na wynik demodulacji jest celem tej pracy.



Rys. 9. Wpływ szerokości pasma na wartości kurtozy detekcji uszkodzenia KS – kurtoza po filtracji, KE- kurtoza obwiedni sygnału

Na rys. 9 pokazano wpływ szerokości pasma na wynik przetwarzania dla wybranej harmonicznnej – jako obiektywną miarę porównania powtórnie wykorzystano kurtozę.

Z rysunku wynika, że najlepszy wynik uzyskano dla szerokości pasma $\pm 0,4$ częstotliwości ząbienia aczkolwiek należy tu dodać że różnice w zakresie pasma 0,3-0,5 częstotliwości ząbienia są niewielkie.

2.3. Demodulacja szerokopasmowa

W pracy [15] zasugerowano, aby w procesie demodulacji wykorzystać cały zakres częstotliwości tak, aby wykorzystać całą informację zawartą w sygnale drganiowym.

Autorzy postanowili wykonać eksperyment numeryczny polegający na wygenerowaniu sygnałów symulacyjnych na podstawie klasycznego równania modulacji:

$$u_{AM}(t) = [1 + m \cdot s_m(t)] \cdot S_C(t)$$

gdzie m jest głębokością modulacji

S_C oznacza sygnał nośny wyrażony jako

$$S_C(t) = \sum_{i=1}^5 U_{0i} \cdot \cos(i \cdot \omega_0 \cdot t + \varphi_i)$$

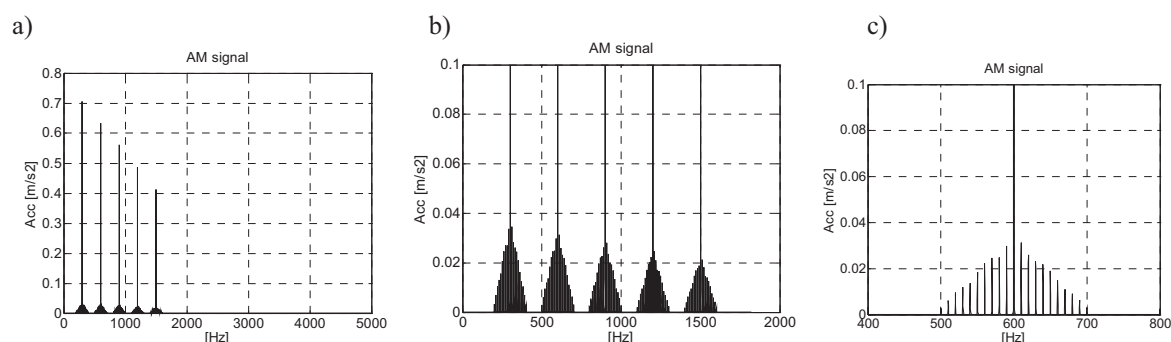
a s_m sygnał modulujący opisany równaniem

$$s_m(t) = \sum_{i=1}^N u_{mi}(t) \cdot \cos(i \cdot \Omega \cdot t + \Phi_i)$$

Wyniki symulacji przedstawiono na rys.10 a-c. Widzimy, że każda z harmonicznych (stanowiąca częstotliwość nośną) jest modulowana dokładnie w ten sam sposób. Różnice w amplitudach wstępnych bocznych wynikają z różnych – celowo tak dobranych – amplitud składowych nośnych. Oznacza to, że informacja diagnostyczna jest dokładnie taka sama.

Uwzględnianie całości pasma zamiast pasma wokół częstotliwości nośnej generuje redundancję.

Zdaniem autorów poprawę wyników dla demodulacji szerokopasmowej w porównaniu do klasycznej demodulacji wokół ząbienia odnotowaną przez MA i LI [15] wiązać należy raczej z wpływem rezonansu ząbienia



Rys. 10. Symulacja modulacji amplitudowej w przekładni zębatej:
a), b) widma sygnału, c) fragment widma wokół jednej z harmonicznych

2.4. Demodulacja adaptacyjna

Demodulacją adaptacyjną zajmował się Brie [16]. Adaptacja polegała na doborze szerokości pasma różnego dla demodulacji amplitudowej i fazowej. Adaptację dla demodulacji amplitudowej wprowadził Gelman [24] który zaproponował aby w ramach zakresu częstotliwości $\pm 0,5f_{\text{zazębienia}}$ wykorzystywać tylko te składowe sygnału, które zawierają informacje o uszkodzeniu. W ramach zaproponowanej procedury w części pierwszej algorytm identyfikuje składowe odpowiadające wstęgom bocznym i podejmuje decyzje dotyczące ich przydatności w procesie demodulacji w oparciu o SNR. W części drugiej – na podstawie wyników uzyskanych w części pierwszej – dokonywana jest adaptacyjna filtracja i demodulacja sygnału. Zastosowane podejście ekstrakcji cech diagnostycznych oraz adaptacyjna metoda podejmowania decyzji o stanie technicznym dała bardzo dobre rezultaty. Zaproponowana procedura pozwala wykrywać uszkodzenia we wczesnym stadium rozwoju. Pewną wadą tej metody jest skomplikowany algorytm separacji użytecznej informacji, duże wymagania sprzętowe (wymagana bardzo dobra rozdzielczość częstotliwościowa) i co za tym idzie stosunkowo długi czas procesu diagnozowania.

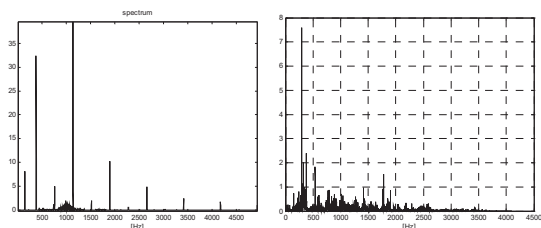
2.5. Demodulacja wokół rezonansu ząbienia

Technika demodulacji wokół rezonansu jest powszechnie stosowana w diagnostyce łożysk tocznych. W diagnostyce przekładni takie podejście zaproponował Wang [18].

Autorzy postanowili również przetestować tę metodę ze względu na imponujące rezultaty uzyskane w pracy Wang. Wykorzystując model dwustopniowej przekładni zębatej [22] zasymulowano uszkodzenie lokalne na stopniu 1. Uzyskano widmo zbliżone do wyników w pracy Wang z charakterystyczną grupą składowych wokół 1000Hz. Ponieważ wspomniany model był dostrajany na potrzeby wcześniejszych prac autorów postanowiono poszukiwać analogicznego obrazu w widmie sygnału rzeczywistego.

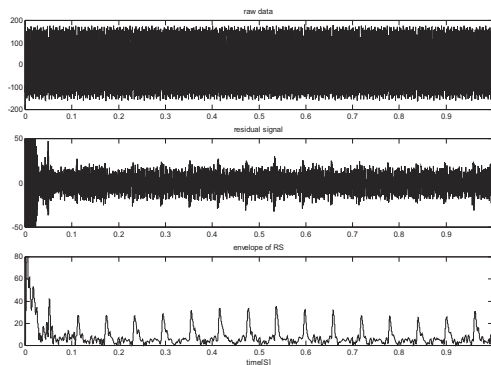
Niestety dla sygnałów rzeczywistych sytuacja nie jest taka prosta. Jak pokazano na rys. 11b w widmie sygnału rzeczywistego dla przekładni z uszkodzeniem lokalnym nie są tak widoczne jak dla modelu wzmocnienia grupy wstępnych bocznych.

Wyniki uzyskane po zastosowaniu tej samej procedury (z tymi samymi wartościami f_d , f_g) zarówno dla sygnału z modelu jak i sygnału rzeczywistego pokazano odpowiednio na rys. 12 i 13.

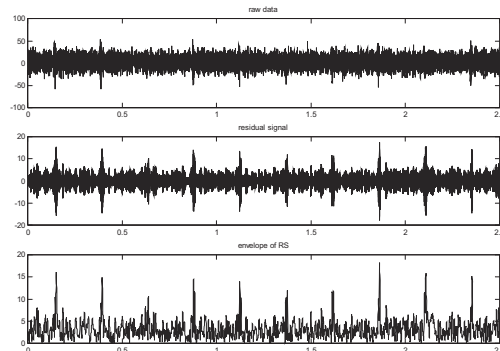


Rys. 11. Widma sygnałów: a) z modelu
b) rzeczywistego

Rysunki 12 i 13 przedstawiają: nieprzetworzony sygnał drganiowy, sygnał po filtracji pasmowo-przepustowej w zakresie obejmującym rezonans ząbienia i obwiednię dla odfiltrowanego sygnału odpowiednio dla modelu i sygnału drganiowego z przekładni z uszkodzeniem zarejestrowanego w czasie normalnej eksploatacji.



Rys. 12. Wyniki dla sygnału z modelu:
a) nieprzetworzony sygnał,
b) sygnał odfiltrowany wokół rezonansu,
c) obwiednia odfiltrowanego sygnału



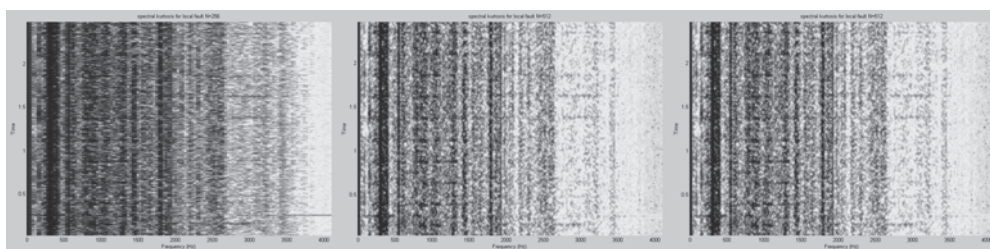
Rys. 13. Wyniki dla sygnału rzeczywistego:
a) nieprzetworzony sygnał,
b) sygnał odfiltrowany wokół rezonansu
c) obwiednia odfiltrowanego sygnału

Na podstawie zaprezentowanych przykładów można stwierdzić, że impulsy charakterystyczne dla uszkodzeń lokalnych w sygnałach nieprzetworzonych są zupełnie niewidoczne (symulacja uszkodzenia przez zmianę sztywności ząbienia $kz_{uszk}=0.9kz_{ok}$ - rys 12) albo trudne do wykrycia (sygnał rzeczywisty – rys 13).

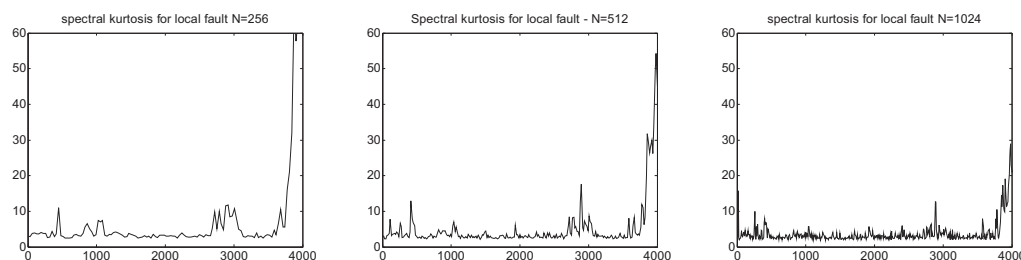
Filtracja a następnie demodulacja wokół rezonansu ząbienia pozwala jednoznacznie stwierdzić wystąpienie uszkodzenia lokalnego.

2.6. Określanie zakresu częstotliwości przez kurtozę widmową

Zastosowanie kurtozy widmowej w poszukiwaniu optymalnego pasma w demodulacji zaproponowali Randall i Antoni [25, 26]. Metoda ta polega na analizie „impulsowości” sygnału na podstawie mapy czasowo-częstotliwościowej. Wadą tej metody jest trudność w wyznaczaniu mapy czasowo-częstotliwościowej oraz zależność uzyskiwanych wyników w funkcji przyjętej rozdzielczości (rys 15).



Rys. 14. Mapy czasowo-częstotliwościowe dla różnej rozdzielczości analizy ($N=256$, $N=512$, $N=1024$)



Rys. 15. Zależność wyniku kurtozy widmowej od przyjętej rozdzielczości STFT (por rys. 14)

3. OPTYMALNY ZAKRES CZĘSTOTLIWOŚCI - DEFINICJA

W wielu pracach jako miarę występowania uszkodzenia przyjmuje się parametr statystyczny procesu określany mianem kurtozy. Kurtoza dla sygnału będącego w przybliżeniu procesem gausowskim przyjmuje wartość równą 3, dla sygnału zawierającego informację o uszkodzeniu lokalnym kurtoza zwiększa swoją wartość. Autorzy postanowili zbudować obiektywne kryterium oceny bazując na kurtozie wyznaczanej z odfiltrowanego sygnału drganiowego. Parametry filtru dobierane są adaptacyjnie tak, aby uzyskać maksymalną wartość kurtozy. Idea tego kryterium polega na wyekstrahowaniu informacji o uszkodzeniu reprezentowanej przez sygnał impulsowy. Czym bardziej impulsowy charakter sygnału tym łatwiej wykryć uszkodzenie lokalne.

Problem separacji informacji użytkowej od informacji o charakterze zakłóceń dla zadanego problemu, czyli w tym przypadku kwestia doboru pasma użytego w demodulacji zarówno w sensie położenia jak i szerokości jest niezwykle istotnym aspektem diagnostyki. O potrzebie zdefiniowania optymalnego zakresu pasma pisze między innymi Radkowski [7].

Kryterium zostało zdefiniowane następująco:

$$FC(f_L, f_U) = \max \left(Kurtosis \left(F_{f_L}^{f_U} (S(t)) \right) \right)$$

gdzie:

FC oznacza funkcję 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

Procedurę tę można łatwo zmodyfikować tak aby wartość kurtozy obliczana była nie bezpośrednio z odfiltrowanego sygnału lecz z obwiedni sygnału (por rys. 8 i 9). Na potrzeby tej pracy testowano obie wersje kryterium.

4. PROCEDURA POSZUKIWANIA OPTYMALNEGO PASMA

W ramach pracy opracowano procedurę wykorzystującą opisaną powyżej kryterium do wyszukiwania optymalnego (w sensie maksymalnej kurtozy) zakresu częstotliwościowego. Procedura jest dwuetapowa – pierwszy etap służy do wyznaczenia wartości kurtozy dla różnych kombinacji częstotliwości granicznych.

Etap drugi polega na selekcji takich parametrów filtracji aby wartość kurtozy odfiltrowanego sygnału była maksymalna. Jako efekt na wyjściu procedury uzyskujemy optymalnie (w sensie zdefiniowanego kryterium) przefiltrowany sygnał z wyznaczoną wartością kurtozy.

Zaproponowane obiektywne kryterium oparte na kurtozie umożliwia porównanie wyników demodulacji dla różnych zakresów częstotliwości, dla różnych punktów pomiarowych czy warunków eksploatacyjnych.

5. PRZYKŁADOWE WYNIKI

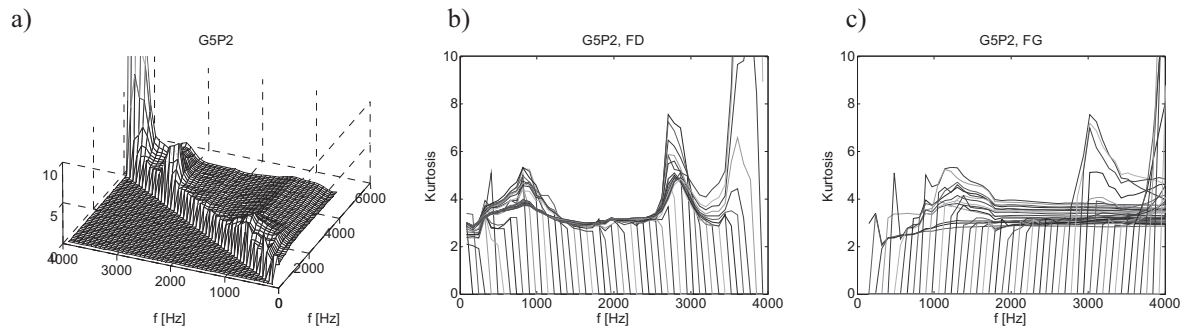
Na rys. 16 zaprezentowano wyniki analiz dla punktów pomiarowych nr 2 i nr 4.

Na rys. 16a przedstawiono mapę będącą trójwymiarowym rozkładem funkcji celu - wartości kurtozy jako funkcji dwóch zmiennych – częstotliwości granicznych filtru. Wyraźnie widoczne maksima lokalne funkcji celu świadczą o występowaniu kilku interesujących diagnostycznie zakresów częstotliwości. Rys. 16b i c przedstawiają przekroje trójwymiarowej mapy.

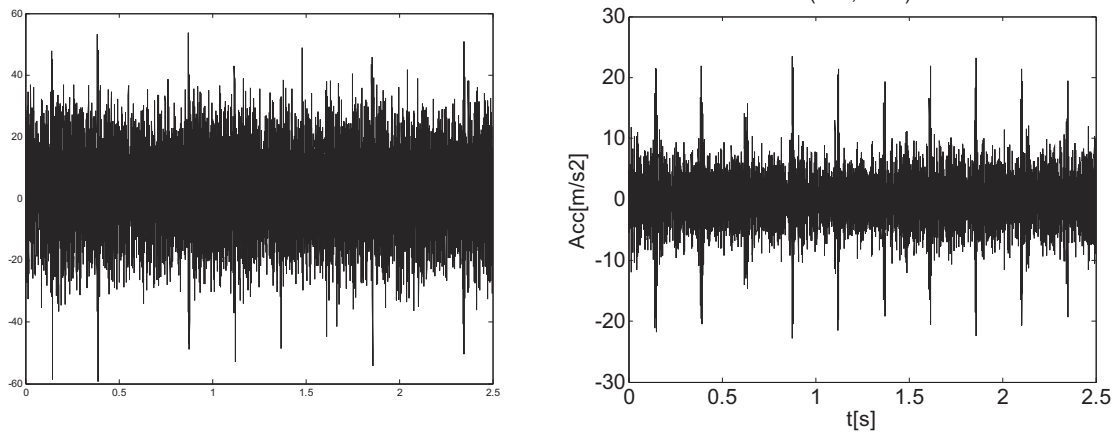
Na rys. 18 przedstawiono wyniki procedury dla punktu pomiarowego nr 4. Ponownie zidentyfikowano zakresy częstotliwości z wyraźnie wyższą kurtozą.

Istnienie takich zakresów potwierdzają także prace prowadzone przez zespół prof. Wilka [9]. Wykorzystanie do poszukiwania obszarów rezonansowych naturalnie wzmacniających informację diagnostyczną metodami analizy modalnej jest alternatywną procedurą do zaproponowanej w tej pracy. Wymaga to oczywiście prowadzenia dalszych badań.

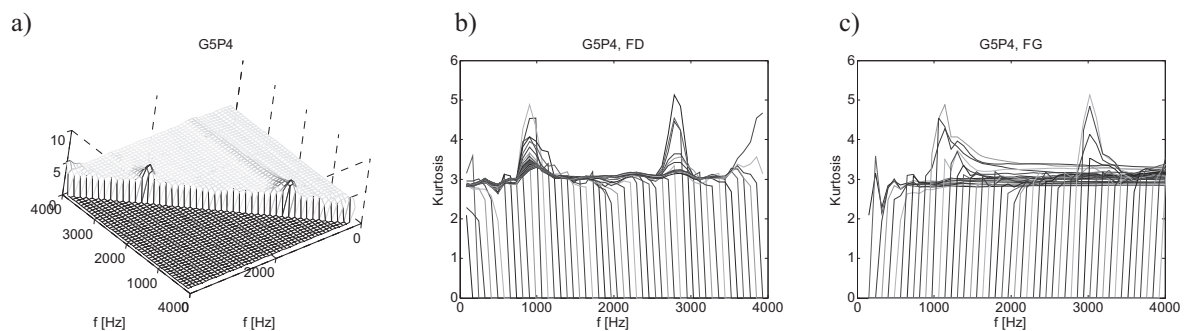
Dla porównania pokazano także sygnały nieprzetworzone i optymalnie przefiltrowane dla punktu 2 i punktu 4 tej samej przekładni pracującej w podobnych warunkach (rys. 18, 19). Pomiar był zrealizowany w możliwie minimalnym odstępnie czasowym.



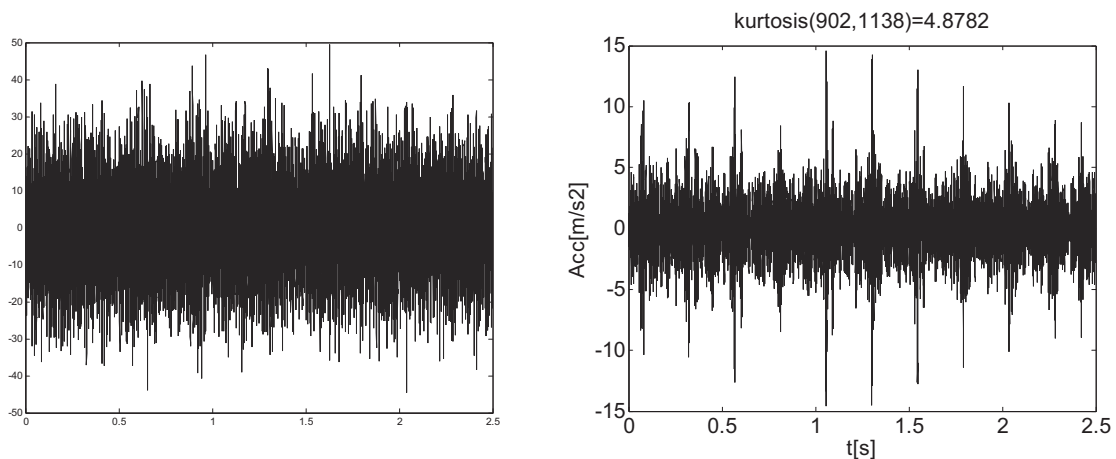
Rys. 16. Rozkład wartości kurtozy (dla punktu 2) jako funkcji częstotliwości granicznych filtra b) przekrój dla dolnej częstotliwości granicznej c) przekrój dla górnej częstotliwości granicznej
 $kurtosis(820, 1220)=5.3404$



Rys. 17. Sygnał nieprzetworzony i sygnał optymalnie odfiltrowany dla punktu 2



Rys. 18. Rozkład wartości kurtozy (dla punktu 4) jako funkcji częstotliwości granicznych filtra b) przekrój dla dolnej częstotliwości granicznej c) przekrój dla górnej częstotliwości granicznej



Rys. 19. Sygnał dla punktu 4 nieprzetworzony i sygnał optymalnie odfiltrowany

Jak łatwo zauważyć dla sygnału z punktu 2 widoczne są pojawiające się okresowo impulsy świadczące o uszkodzeniu. Na podstawie nieprzetworzonego sygnału z punktu 4 stwierdzenie wystąpienia uszkodzenia lokalnego jest niemożliwe. Zastosowanie zaproponowanej procedury pozwoliło z łatwością stwierdzić występowanie uszkodzenia.

Na rys. 8 zestawiono wyniki demodulacji (wartości kurtozy) dla harmonicznych h1-h5 oraz dla optymalnego procesu filtracji (oznaczonej jako opt) w dwóch wariantach – dla kurtozy wyznaczanej bezpośrednio z odfiltrowanego sygnału oraz dla obwiedni z odfiltrowanego sygnału.

Zwłaszcza w tym drugim wariantcie poprawa jest zadawalająca.

Praca ma charakter rozpoznawczy, uzyskane wyniki są bardzo obiecujące i pozwalają postawić tezę o konieczności kontynuowania badań w tym zakresie.

6. WNIOSKI

W pracy skrótowo przedstawiono stan wiedzy dotyczący wykrywania uszkodzeń lokalnych w przekładniach zębatych z wykorzystaniem metod demodulacyjnych. Zaproponowano procedurę optymalizacji przetwarzania, jako kryterium przyjęto kurtozę wyznaczaną bezpośrednio dla odfiltrowanego sygnału bądź dla obwiedni. Wykazano znaczną poprawę skuteczności detekcji uszkodzenia lokalnego.

Zaproponowane obiektywne kryterium oparte na kurtozie umożliwia porównanie wyników demodulacji dla różnych zakresów częstotliwości, dla różnych punktów pomiarowych czy warunków eksploatacyjnych.

Wybór pasma do demodulacji czy punktu pomiarowego oparty na zaproponowanej metodzie jest obiektywny i łatwy do zautomatyzowania.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2005- 2008 jako projekt badawczy.

LITERATURA

- [1] Randall R. B. *A new method of modeling gear faults*. 1982 Journal of Mechanical Design 104, 259–267.
- [2] Bartelmus W. Zimroz R. Hrynyszyn S. *Diagnostyka uszkodzeń lokalnych na podstawie sygnału drgań w maszynach górniczych*. Górnictwo Odkrywkowe.
- [3] Bartelmus W. Zimroz R. *Real and Simulated Vibration Signal Analysis for Fault Detection of Double Stage Gearboxes*. COMADEM 2002. Proceedings of the 15th international congress.
- [4] Bartelmus W. *Computer aided multistage gearbox diagnostic inference by computer simulation*, Scientific papers of the Institute of Mining of the Wrocław University of Technology 2002
- [5] Szabatin J. *Teoria sygnałów* WkiŁ wyd 2 Warszawa 1990
- [6] Bartelmus W. Zimroz R. Hrynyszyn S. *Identyfikacja warunków eksploatacyjnych na potrzeby diagnostyki przekładni planetarnej do napędu koła czerpakowego* XXXIII Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2006.
- [7] Radkowski S. *Wibroakustyczna Diagnostyka Uszkodzeń niskoenergetycznych* Wyd ITE Radom 2002.
- [8] Bartelmus W. Zimroz R. *Wady i zalety analiz: cepstrum, widmo obwiedni i bispectrum w diagnostyce wielostopniowych przekładni zębatych*. 3rd International Congress of Technical Diagnostics. Diagnostics '2004. Poznań.
- [9] Figlus T., Wilk A. *Zastosowanie analizy modalnej do diagnozowania uszkodzeń i zużycia kół zębatych* XXXIII Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn Węgierska Górka 2006.
- [10] Jasinski M., Radkowski S. *Wykorzystanie analizy składowych głównych oraz rozkładów czasowo-częstotliwościowych w diagnostyce przekładni zębatych* XXXIII ogólnopolskie sympozjum Diagnostyka Maszyn Węgierska Górka 2006.
- [11] Cempel C. Staszewski W. *Use of the signal demodulation* Zagadnienia Eksploatacji Maszyn z.4/84/, 1990 1990 str., 505-517.
- [12] Mączak J. *Wykorzystanie zjawiska modulacji sygnału wibroakustycznego w diagnozowaniu przekładni o zębach śrubowych*. Rozprawa doktorska Politechnika Warszawska 1998.
- [13] Randall B. *Frequency Analysis*, Published by Bruel&Kjaer 1987.
- [14] McFadden P. D. *Detecting fatigue Cracks in gears by amplitude and Phase demodulation of the meshing vibration*. Journal of Vibration, Acoustic, Stress and Reliability in Design vol 108 April 1986 s165-170.
- [15] Ma J. and Li C.J. *Gear defect detection through model-based wideband demodulation of vibrations* Mechanical Systems and Signal Processing (1996) 10(5) pp653-665.
- [16] Brie D., Tomczak M., Oehlmann H., Richard A.. *Gear Crack Detection By Adaptive Amplitude And Phase Demodulation*. Mechanical Systems and Signal Processing, v 11, n 1, January, 1997, p149-167.
- [17] Ho D., Randall R.B., *Optimization of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals*, Mechanical Systems and Signal Processing 14 (5) (2000) 763–788.
- [18] Wang W. *Early detection of gear tooth cracking using resonance demodulation technique*. Mechanical Systems and Signal Processing 2001 15(5) 887-903.
- [19] Bartelmus W. Zimroz R., *Advantages and disadvantages of using cepstrum, envelope spectrum and bispectrum for multistage gearbox diagnostic*. 3rd International Congress of

- Technical Diagnostics. Diagnostics '2004. Poznań, Diagnostyka 30/2004.
- [20] Bartelmus W. *Diagnostyka Maszyn Górniczych Górn. Odkryw.* Wyd. Śląsk 1998
- [21] Bartelmus W. *Mathematical Modeling and Computer Simulations as an Aid to Gearbox Diagnostics.* Mechanical Systems and Signal Processing 2001 Vol.15, nr5, s. 855-871.
- [22] Zimroz R. *Metoda diagnostyki wielostopniowych przekładni zębatych w układach napędowych przenośników taśmowych z zastosowaniem modelowania.* Rozprawa doktorska Politechnika Wrocławska Wrocław 2002.
- [23] Gelman L. M., Kripak D. A., Fedorov V. V., and Udovenko L.N. *Condition monitoring diagnosis methods of helicopter units.* Mechanical Systems and Signal Processing 14(4), 613-624, 2000.
- [24] Gelman L. Zimroz R. et al *Adaptive vibration condition monitoring technology for local tooth damage in gearboxes* Conference on Condition Monitoring, King's College, Cambridge 2005, reprinted in Insight.
- [25] Antoni J., Randall R. B. *The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines* MSSP 2005
- [26] Antoni J., *The spectral Kurtosis: a useful toll for characterizing nonstationary signals,* Mechanical Systems and Signal Processing, in press.



Prof. dr hab. inż. Walter BARTELMUS, specjalista z zakresu eksploatacji, dynamiki i diagnostyki maszyn. Autor około 150 publikacji w tym jednej książki oraz współautor trzech monografii. Pracownik Politechniki Śląskiej (1967-1980) Instytutu Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław (1980-1993), Politechniki Wrocławskiej (od 1994). Stypendia i wykłady: Polytechnic of Central London, Swansea University College, Southampton Institute Systems Engineering Research Center, Gunma University, Laboratoire d'Analyse des Signaux & des Processus Industriels. Wykłady na zaproszenia i w ramach programu Sokrates-Erasmus: Vaxjo University, Lulea University, Compiegne UTC, Cranfield University.



Dr inż. Radosław ZIMROZ, absolwent Akustyki Wydziału Elektroniki PWr 1998, doktorat na Wydziale Górniczym PWr 2002 (z wyróżnieniem). Od 1998 w Zakładzie Systemów Maszynowych IG PWr. Staż naukowy (9 miesięcy) w Cranfield University, (SOE/PASE/AMAC). Zainteresowania z zakresu modelowania i diagnostyki przekładni zębatych, przetwarzania sygnałów drganiowych, zastosowania metod sztucznej inteligencji w diagnostyce maszyn, systemów monitorowania i diagnozowania drgań.