

PLD WE WSPOMAGANIU DEMODULACJI DRGAŃ MASZYN

Piotr KRZYWORZEKA, Witold CIOCH

Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, AGH
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
email: krzyworz@agh.edu.pl

Streszczenie

W diagnozowaniu maszyn, dla których realizacja celu podstawowego obejmuje powtarzanie sekwencji zdarzeń podobnych, można wykorzystać PLD dla wspomaganie demodulacji sygnału drganiowego w niestacjonarnych stanach pracy maszyny. Zastosowana transformacja skali czasu powoduje wyrównanie długości dyskretnej reprezentacji kolejnych cykli i zbliża rezultat do sygnału stacjonarnego zachowując modulacje AM i PM. Nawet zastosowanie demodulatorów asynchronicznych prowadzi wówczas do wyraźnego zmniejszenia uchybu obciążenia rezultatu. zmniejszenia obciążeń wyników. Przedstawiono rezultaty badań dla sygnałów modelowych i rzeczywistych.

Słowa kluczowe: diagnostyka, modulacja, synchronizm.

PLD AIDED DEMODULATION OF MACHINE VIBRATIONS

Summary

This paper is concerned with the PLD (Procedure of Linear Decimation) aided output biasing elimination which takes into account some particularities of rotating machinery signal modulation. Rotating speed fluctuations or trend affect demodulation procedure due to nonlinear trend of carrier frequency. The proposed time scale transformation, denoted as PLD, aims to reduce demodulation error by employing linear approximation of carrier cycle short-term changes. Some examples of simulated and real signal asynchronous demodulations are also discussed hereby.

Keywords: diagnostics, modulation, synchronism.

1. DLACZEGO DEMODULACJA?

Rozważania modelowe, uogólniające wieloletnie doświadczenia diagnostyki wibroakustycznej implikują demodulację jako sposób odtworzenia zmienności właściwej wczesnym stadium ewolucji wielu kategorii uszkodzeń w prostszej formie i przy mniejszych zakłóceniach, niż ujawnia to bezpośrednio drganiowy sygnał mierzony y .

Mimo pewnych analogii MSM modulacji zamierzonych amplitudy AM, kąta PM, FM, czy położenia impulsów PPM i użytecznych kategorii modulacji sygnału maszyny MSM, utrudnienia powodują odmienności tych ostatnich. Wymieni tu warto:

- brak wyraźnego rozgraniczenia między sygnałem nośnym y_c (nieznany); a zmodulowanym (mierzonym) y ;
- bezpośrednią niedostępność sygnału nośnego;
- nieznaną modulujący sygnał wartościowy x ;
- niepełną (lub brak) informację o modulatorze;

- niestacjonarność procesu MSM; zwłaszcza krótkoterminowe trendy i nieinformacyjne fluktuacje częstotliwości nośnej.

Wybór właściwej procedury demodulacji PD utrudnia ich brak. Stosowane zostały opracowane bez uwzględnienia specyfiki MSM.

Stąd przydatność konkretnych PD w diagnozowaniu nie bywa bezwarunkowa, a ich skuteczność pozostawia wiele do życzenia.

Nie wnikając w szczegóły, w każdym przypadku rezultaty demodulacji mogą stanowić wiarygodną bazę oceny stanu technicznego jedynie wówczas, jeśli PD będzie estymatorem efektywnym, to jest nieobciążonym i o minimalnej wariancji. Wariancja oceny rezultatu i jej liniowa reprezentacja – uchyb statystyczny, nie stanowią tu tak istotnego problemu jak w innych zastosowaniach pomiarowych, natomiast obciążenie oceny porównywalne z interwałami skali może prowadzić do mylnej diagnozy.

Jak się jednak okaże, dotychczas stosowane sposoby demodulacji drgań w czasie rzeczywistym nie kontrolują obciążenia rezultatu, bądź nie uwzględniają jego przyczyn, ponieważ są

optymalizowane dla określonych i stacjonarnych sygnałów nośnych.

2. PRZESŁANKI WSPOMAGANIA PLD

2.1 Procedura liniowej decyzji

Wspomaganie PLD dotyczy MSM maszyn dla których realizacja celu podstawowego wiąże się z cyklicznym powtarzaniem sekwencji zdarzeń podobnych, lecz nie identycznych.

Objmuje wybrane kategorie demodulacji czasu rzeczywistego (tu PM i AM) w niestacjonarnych stanach eksploatacyjnych

Pomijając szczegóły (wielokrotnie opisywane), PLD prowadzi do opisu zmienności sygnału w innej skali czasu, takie że:

- opis zmienności staje się prostszy,
- zachowane są istotne cechy zmienności informacyjnej,
- zmienność nieinformacyjna ulega redukcji.

Taka transformacja pozwala w pewnych przedziałach czasowych i dla pewnych kategorii niestacjonarności zredukować niestacjonarność sygnału do stopnia umożliwiającego stosowanie prostszych metod analizy (np. widmowej) oraz procedur demodulacji właściwych sygnałom stacjonarnym. Polega ona na synchronizacji nowego zegara właściwie dobranym ciągiem zdarzeń referencyjnych. Nie są one tożsame z cyklem chwilowym (to byłby przypadek analizy rzędów), lecz pewną jego charakterystyką synchronizującą $\psi(\Theta)$.

Po wielu próbach dokonano zadawalającego wyboru tej charakterystyki aproksymując w oknie analizy T_k monotoniczny trend referencyjnego cyklu chwilowego liniowym przyrostem $\psi(\Theta)$ co pozwoliło na opracowanie przybliżonej metody synchronizacji dyskretnych reprezentacji sygnałów drgań ciągiem próbek $\psi(\Theta)$, uzyskanej bądź na drodze pomiaru kąta obrotu, bądź drogą autosynchronizacji.

Poprzedzając demodulację PLD:

- redukuje nieinformacyjny trend cyklu (monotoniczną zmianę Θ),
- zachowuje w stopniu na ogół wystarczającym informacyjne fluktuacje cyklu chwilowego Θ reprezentujące modulacje położenia impulsu PPM oraz kąta PM,
- zachowuje także (co oczywiste), modulację amplitudy AM.

2.2. Kategorie modulacji a celowość wspomaganii

Potrzeba, rodzaj i skuteczność wspomaganii demodulacji niekoniecznie bywają *a priori* oczywiste. Szereg pytań wymaga najpierw odpowiedzi – a przede wszystkim to:

- a) jaki rodzaj modulacji dominuje w badanym sygnale;
- b) co chcemy uzyskać – jaka charakterystyka ξ rezultatu PD jest użyteczna w diagnozowaniu, także w sensie możliwości stworzenia skali pomiarowej wybranej własności stanu;
- c) jakich kategorii niestacjonarności wspomaganie może i ma dotyczyć;
- d) jak wspomaganie wpływa na niepewność oceny ξ ;
- e) obecność i rodzaj związków sygnałów wejściowych modulatora (x, y_c).

Obecność (b) jest cechą charakterystyczną wyróżniającą MN, bowiem:

W modulacjach zamierzonych (np. telekomunikacyjnych), x i y_c są nieskorelowane. Sygnał nośny nie ma wpływu na informację wartościową, a jedynie na jej transfer – inaczej mówiąc sygnały modulujący i nośny nie mają wspólnej przyczyny

W modulacjach niezamierzonych natomiast, jeśli ten sam ruch jest przyczyną zmian modulujących, jak też tych, które je przenoszą (sygnału nośnego), często występuje synchronizacja kodowania IW cyklem kinematycznym.

Wówczas procesy drganiowe $\{x\}$ i $\{y_c\}$ związane z zamierzonymi własnościami dynamicznymi i eksploatacyjnymi, taktowane są tym samym zegarem, którego zbiór zdarzeń referencyjnych wyznacza roboczy cykl kinematyczny (por. rys. 1).

Reasumując, Im bliżej badanej MSM do zamierzonego analogu, tym mniej użyteczna może okazać się PLD (co nie wyklucza innych metod wspomaganii – np. PLL [6]).

2.3. Ocena jakości wspomaganii

Postulat użyteczność rezultatu w diagnozowaniu stawia procedurom demodulacji wymagania nieco inne niż system telekomunikacyjny.

Dokładne odtwarzanie kształtu x nie jest generalnie konieczne, nie bywa on zresztą jednoznacznie zdeterminowany, jego losowa natura manifestuje się zwłaszcza w przedziale obserwacji jednostkowej T .

Dla tworzenie skali diagnostycznej kluczowym jest znalezienie wiarygodnych i odtwarzalnych wzorców opartych o uśrednione charakterystyki ξ realizacji sygnału x . ξ może reprezentować np.:

- średnią energię w przedziale pomiaru (RMS):
- ocenę kształtu sygnału modulującego (estymaty bezwymiarowe, *skewness*, *kurtosis*);
- informacyjny i poprawnie odtworzony fragment widma sygnału x .

Stworzenie syntetycznego wskaźnika oceniającego ilościowo różne cechy odtworzonego sygnału modulującego utrudnia przede wszystkim ich niepełna znajomość w praktyce.

Przyjmując za podstawowe postulat poprawnego odtwarzania wartości skutecznej modulacji określonej kategorii (AM, lub PM) można zaproponować wskaźnik porównawczy interpretowany dalej jako uchyb resztkowej niestacjonarności δ_{RNS} – względną różnicę wartości skutecznej ocenianej i referencyjnej.

Formalizacja wiąże się z rodzajem modulacji i wyborem ξ .

2.4 Wpływ wyboru $\psi(\Theta)$

Oprócz oczywistego znaczenia skali czasu dynamicznego, warte zainteresowania okazują się dwa inne przypadki – ich możliwości zestawia rys. 1.

PLD wprowadza czas η synchronizowany pewną charakterystyką cyklu $\psi(\Theta)$. Jej wybór okazuje się krytyczny zwłaszcza w przypadku modulacji PM.

Gdy $\psi(\Theta)$ odpowiada cyklowi chwilowemu Θ , opis sygnału w dziedzinie częstotliwości przedstawia widmo rzędów wykorzystywane również w diagnozowaniu [8] (rys. 1 b). Widma rzędów cechuje dobra rozdzielczość i dynamika. Ich estymacja natomiast wymaga złożonych obliczeń i precyzyjnego pomiaru fazy (położenia) [*ibidem*]. Ponadto w tak zdefiniowanej skali 'η' tracona jest informacja o fluktuacjach cyklu, które mogą być wynikiem modulacji PPM drgań przez dynamiczne procesy resztkowe, cenne źródło wczesnej informacji diagnostycznej [7].

Natomiast, w stanach niestacjonarnych demodulacja składowych PPM mogłaby być wspomagana przez transformację skali czasu zachowującą wartościową składową fluktuacji częstotliwości chwilowej, a redukującą monotoniczny trend $\Theta_C(\eta)$.

Niedogodności powyższej pozwala w wielu przypadkach uniknąć liniowa aproksymacja monotonicznych zmian cyklu nośnego. Wówczas w przedziale T:

$$\psi(\Theta) = \Theta_{ref} \left(1 + \frac{\Delta_{\Theta}}{\Theta_{ref}} t \right) \quad (1)$$

3. WSPOMAGANIE DEMODULACJI AMPLITUDY I KĄTA

3.1 Sygnał analityczny w opisie modulacji

Dogodne narzędzie formalne opisu stanów ustalonych procedur demodulacji stanowi analityczna reprezentacja sygnału oparta o transformatę Hilberta [4].

Jej postać wykładnicza:

$$Y(t) = A(t)e^{j\Phi(t)} \quad (2)$$

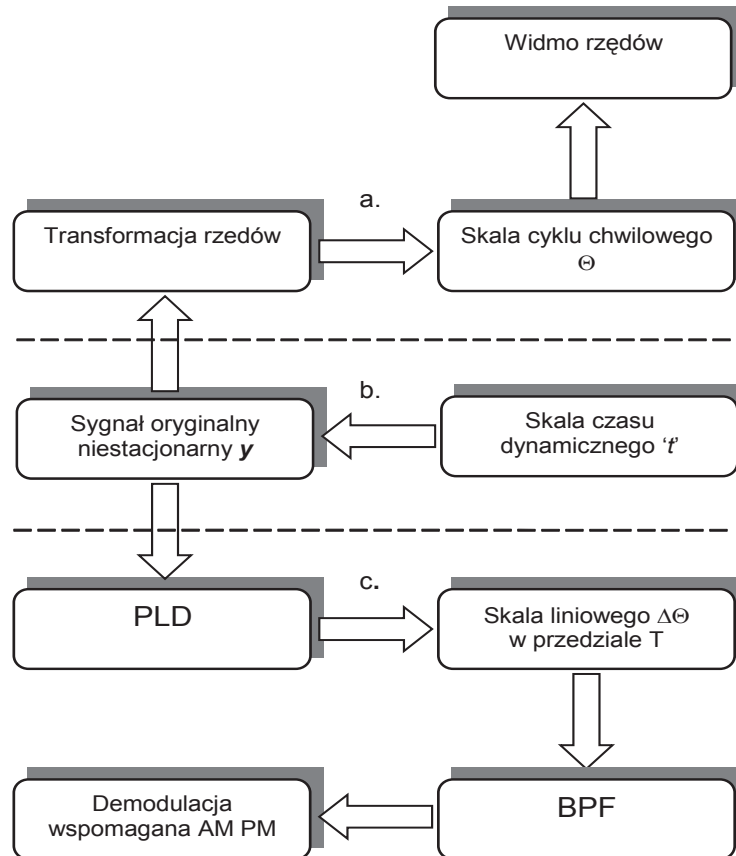
pozwała na rozróżnienie amplitudowej $A(t)$ i fazowej $\Phi(t)$ składowej zmienności y w dziedzinie czasu, lecz jedynie dla sygnałów wąskopasmowych $\Delta f/f_c \ll 1$ [4].

Formuła (2) często stosowana bywa bezpośrednio dla demodulacji amplitudy oraz (po dodatkowych zabiegach, także domniemanych modulacji niezamierzonych kąta [4 6]. Metody te, określane mianem niekoherentnych, lub asynchronicznych AD [35] nie wymagają dostępności, ani odtwarzania określonej formy sygnału nośnego y_C . Jedynie pewne jego parametry, jak na przykład f_C , definiują parametry niezbędnej wstępnej filtracji pasmowej. Czy stanowią zadawalające rozwiązanie przy niestacjonarnym sygnale nośnym – o tym dalej?

3.2. Wspomaganie PLD w demodulacji amplitudy

Jeśli przyjąć, że AM sygnału maszynowego jest modulacją wąskopasmową o paśmie $2F_x$, (F_x pasmo sygnału modulującego), to metoda obwiedni – $Abs[Y]$ (2) wymaga najmniej ograniczeń, i daje dobre rezultaty dla sygnałów o symetrycznej obwiedni (a po pewnej modyfikacji, także niesymetrycznej). Nie wymaga odtworzenia częstotliwości nosnej a jedynie lokalizacji pasma modulacji wokół domniemanej f_C . Prosty filtr pasmowy okazuje się wystarczający w stanach stacjonarnych. Zmiany częstotliwości nośnej wymagają dostosowania częstotliwości centralnej filtru, bowiem metoda $Abs[Y]$ nie jest selektywna, a ponadto wykazuje znaczną wrażliwość na interferencje innych modulacji bliskich [6].

Wspomagająca rola PLD ogranicza się do transformacji sygnału zmodulowanego y .



Rys. 1. Możliwości reprezentacji sygnału niestacjonarnego w różnych skalach czasu
 a) czas dynamiczny, charakterystyki dwuparametrowe;
 b) czas cyklu chwilowego, widma rzędów;
 c) czas aproksymacji liniowej $\psi_T(\Theta)$, wspomaganie demodulacji

3.3. Wspomaganie PLD w demodulacji kąta

W przypadkach niestacjonarności eksploatacyjnej maszyny, kiedy prędkość obrotowa, a zatem i częstotliwość nośna nie są stałe, źródeł błędów obciążenia rezultatu DP należy szukać w odtwarzaniu niewłaściwych składowych fazy chwilowej. Można wyróżnić cztery składowe o różnej jakościowo zmienności i odmiennej, choć nie zawsze jednoznacznej interpretacji [6]:

$$\text{Arg}[Y(jt)] = \Phi(t) = \Phi_C(t) + \Phi_x(t) + \Phi_F(t) + \Phi_T(t) \quad (3)$$

gdzie:

1. $\Phi_C(t)$ – faza sygnału nośnego przy ustalonym cyklu Θ_C ;
2. $\Phi_T(t)$ – rezultat monotonicznej zmiany cyklu nośnego;
3. $\Phi_x(t)$ – składowa informacyjna, tu otworzenie zmienności DPR;
4. $\Phi_F(t)$ – nieinformacyjne fluktuacje związane ze stanem eksploatacyjnym, lub niedoskonałością demodulacji.

Pasma częstotliwości odpowiadające pochodnym składowym 1,...,4 powinny być rozłączne, ale nie zawsze są

W przyporządkowanie różnych kategorii zmienności odmiennym własnościom realnego obiektu diagnostyki [6] pozwala w ogólnym przypadku przyjąć, że:

- a) fluktuacje cyklu chwilowego reprezentują zmienność informacyjną;
- b) krótkoterminowy monotoniczny trend cyklu nośnego reprezentuje zakłócającą zmianę kategorii stanu eksploatacyjnego.

Demodulacja jest w tej sytuacji formą selekcji zmienności (a) przy zakłócającym, lecz potencjalnie wspomagającym działaniu (b).

Właściwie dobrana charakterystyka $\psi(\Theta)$ redukuje Φ_T (PLD).

Operacja *detrend* eliminuje Φ_C :

$$x \Rightarrow \Phi_x = \text{detrend}\{\text{Arg}[Y(t)]\} \quad \text{dla skali } 't' \quad (4)$$

$$x_u \Rightarrow \Phi_{xu} = \text{detrend}\{\text{Arg}[U(\eta)]\} \quad \text{dla skali } '\eta'$$

4. EKSPERYMENTY SYMULACYJNE

4.1. Założenia

Weryfikacja asynchronicznych metod demodulacji AM i PM, wspomaganych, lub nie, była przedmiotem eksperymentu symulacyjnego, którego etapy zestawia rys. 6.6.

Porównanie wyników dotyczyło RMS odtworzonych sygnałów x oraz ich widm RMS w zakresie domniemanej użyteczności dla diagnozowania.

Dla przydatności wspomaganie metody obwidni przez PLD badano także obecność i rodzaj związków sygnałów wejściowych modulatora (x, y_c), a konkretnie, czy jest synchronizowany cyklem nośnym.

W przypadku PM symulacje tu prezentowane miały przede wszystkim na celu ocenę skuteczności PLD w przybliżaniu cyklu nośnego i w konsekwencji redukcji fluktuacji resztkowych.

4.2. Sygnały modelowe, wzorcowanie DP

Z powodu niedostępności sygnału modulującego MSM ocena skuteczności demodulacji może być zrealizowana jedynie poprzez wzorcowanie PD dwoma sygnałami modelowymi, podobnie zmodulowanymi, lecz o różnych składowych nośnych, Są to:

- sygnał referencyjny o $f_c = \text{const}$;
- sygnał o niestacjonarnej składowej nośnej - $f_c = \text{var}$.

Obie kategorie obejmowały:

- jednoczesne modulacje AM i PM tego samego sinusoidalnego sygnału nośnego;
- modulacje sygnałem jedno lub dwutonowym, albo falą prostokątną;
- sinusoidalne składowe niskoczęstotliwościowe;
- szum addytywny.

Testy dotyczyły liniowego trendu nośnej f_c , aproksymowanego przez PLD liniową zmianą cyklu.

Jednocześnie demodulowano sygnał referencyjny o $f_c = \text{const}$.

Ponadto zbadano skuteczność PLD dla: sygnału modulującego AM:

- o stałej częstotliwości;
- o trendzie częstotliwości podobnym trendowi f_c ,
oraz parametry charakterystyczne PLD, decydujące o jej skuteczności.

Jak wspomniano przy omawianiu założeń PLD, po transformacji $'t' \Rightarrow '\eta'$ $'f' \Rightarrow 'f_i'$ otrzymujemy zapis sygnału próbkowany jednolicie,

$h = \text{const}$ w nowej skali czasu. Wartość h wybierano arbitralnie, tak jednak by zachować sens fizyczny charakterystyk ξ w odniesieniu do badanego obiektu w ruchu - tj. przede wszystkim zidentyfikować składowe kinematyczne widma w rzeczywistym zakresie ich częstotliwości jakie występują w trakcie eksploatacji.

W przeprowadzonych symulacjach, dla prezentacji widm $U(f_i)$ przyjęto jako referencyjną:

$$f_a = (f_0 + f_1) / 2 - \text{tj. średnią częstotliwość nośną w przedziale } T;$$

Ponadto rejestrowano istotne dla jakości, a nawet wykonalności PLD wskaźniki:

- $\delta f_c = 100(f_0 - f_1) / f_a$ - procentowy przyrost częstotliwości nośnej w przedziale T ;
- $\delta \Theta$ - procentowy przyrost cyklu aproksymującego (na cykl).

4.3. Ocena rezultatu DP

Jako reprezentacja błędu odtworzenia x posłużył w pierwszym przybliżeniu uchyb średniokwadratowy, ściślej jego liniowa reprezentacja - wartość skuteczna RMS.

Nie jest to ocena selektywna. Jednak stosowane w Europie skale diagnostyczne często klasyfikują wg. wartości poziomu RMS drgań, a kolejne wartości progowe są dość odległe (> 6 dB), łączna ocena niepewności i obciążenia okazuje się wystarczająca. Bardziej wyrafinowane metody oceny jakości demodulacji znajdzie dociekliwy czytelnik w [6].

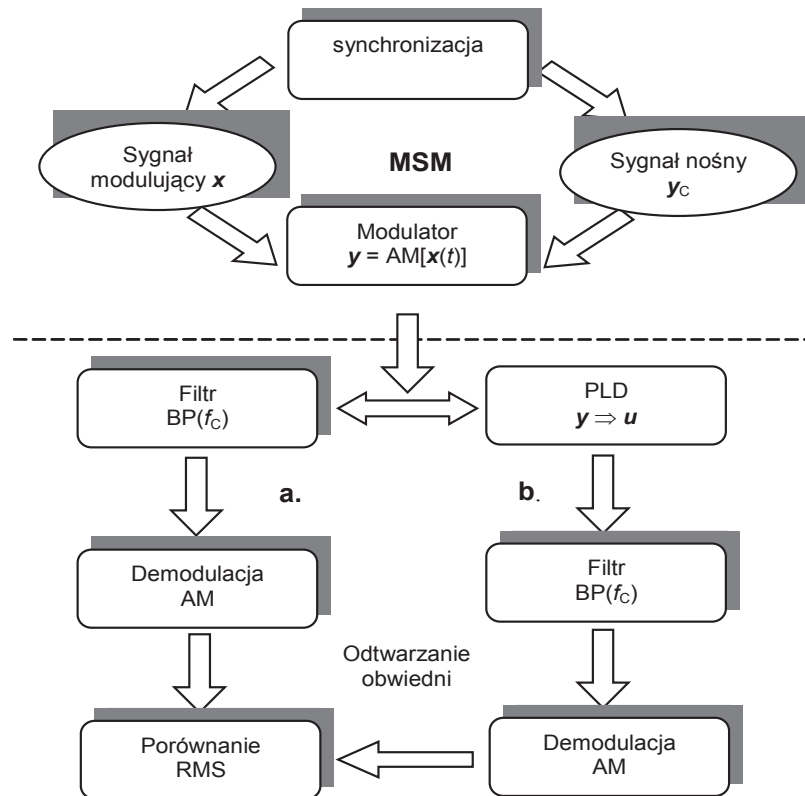
Zamieszczone w tabeli 1 uchyby względne pozwalają ocenić

- czy stopień wspomaganie PLD jest akceptowalny?
- czy filtracja fluktuacji resztkowych jest skuteczna?

4.4. Wybrane rezultaty i wnioski

Przykłady ilustrują przypadki charakterystyczne dla możliwych rzeczywistych AM i PM sygnałów, a także możliwości PLD redukcji skutków trendu f_c .

Autorzy pragną usprawiedliwić brak rzeczywistej skali rzędnych wyników pomiaru drgań Nie stanowiąc tu informacji wartościowej byłyby one czystą redundancją w toku wywodów generalnie dotyczących wykrywania zmian innowacyjnych, lub zakłócających, ale zawsze względem referencji w podobnej skali.



Rys. 2. Alternatywne tory demodulacji AM:

- a) bez wspomagania;
b) wspomaganie PLD

- $\varepsilon_1 = (-X_0 + X_R) / X_0 * 100\%$
- $\varepsilon_2 = (-X_0 + X_{UF}) / X_0 * 100\%$
- $\varepsilon_3 = (-X_0 + X_U) / X_0 * 100\%$
- $\varepsilon_4 = (-X_0 + X_D) / X_0 * 100\%$
- $\varepsilon_5 = (-X_R + X_{UF}) / X_0 * 100\%$
- $\varepsilon_6 = (-X_R + X_D) / X_0 * 100\%$

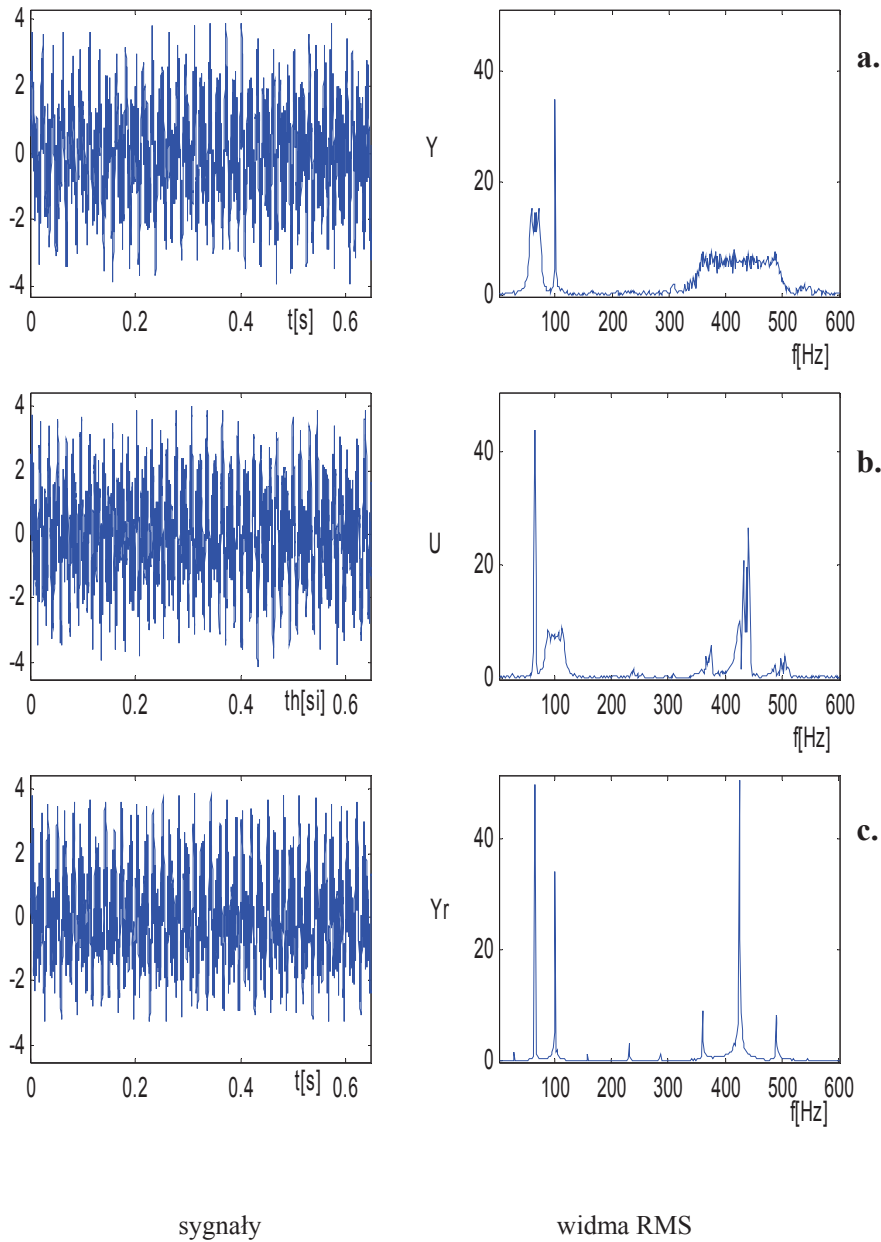
- X_0 – sygnału modulującego x_0 ;
- X_D – rezultat PD bez PLD
- X_U – rezultat PD, PLD;
- X_{UF} – rezultat PD, PLD, HP
- X_R – rezultat PD sygnału referencyjnego y_R ,
- $f_c = \text{const}$

Wartości $\delta f_c\%$, $\delta \Theta\%$ (Tab. 1) określają w przybliżeniu górną granicę przedziału skuteczności PLD w przeprowadzonych eksperymentach symulacyjnych.

Dla MSM wobec niedostępności realnych sygnałów modulujących przyjęto jako referencyjne rezultaty PD wspomaganiej – X_U dla AM, X_{UF} dla PM

Tabela 1.

| no | Typ Mod. | uchyby RMS % | | | | | | dane PLD | | uwagi |
|----|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|--|
| | | ε_1 | ε_2 | ε_3 | ε_4 | ε_5 | ε_6 | $\delta f_c\%$ | $\delta \Theta\%$ | |
| 1 | AM | -25,4 | -15,1 | -14,8 | -20,1 | 10,6 | 5,4 | 35,8 | -3,02 | $x - \text{sqr}$ AM $f_x = \text{const}$ |
| 2 | PM | -12,3 | -12,9 | 786 | 8537 | -0,6 | 8550 | | | $x - \text{sqr}$ AM $f_x = \text{var}$ |
| 3 | AM | -18,8 | -15,1 | -14,6 | -19,3 | 4,2 | -0,56 | | | $x - \text{sin}$ AM |
| 4 | PM | -19,2 | -13,8 | 784 | 8546 | 5,5 | 8565 | | | $f_x = \text{const}$ |
| 5 | AM | -20,7 | -9,52 | -9,2 | -17,4 | 11,6 | 3,35 | | | |
| 6 | PM | -11 | -3 | 1148 | 9980 | 7 | 9990 | | | |



Rys. 3. Symulacja DAM sygnału modulowanego AM i PM falą prostokątną, $f_M = \text{const}$

- a) sygnał oryginalny;
- b) sygnał po transformacji PLD;
- c) sygnału referencyjny, $f_C = \text{const}$

4.5. Uwagi

Jeśli niestacjonarność sygnału nośnego potraktować jako zakłócenie obciążające rezultat DMS, to w określonych przypadkach wspomaganie może znacznie zredukować obciążenie estymat RMS odtwarzanego x : Wskazują to wartości ε_2 i ε_5 (Tab. 1).

Wspomaganie jest tym bardziej skuteczne im lepiej PLD odtwarza, (a właściwie przywraca) skalę czasu dynamicznego. Odtworzenie dokładne,

w praktyce na ogół niepotrzebne, sygnału nośnego o częstotliwości oryginału, pozwala odzyskać oryginalny kształt sygnału modulującego w dziedzinie czasu η (por rys 6.13c)

Aproksymacja liniowo-odcinkowa cyklu nośnego w przedziałach o monotonicznej zmianie częstotliwości nośnej rzędu nawet 30–40 % pozwala na odtworzenie wartości skutecznej modulacji (RMS x) z dokładnością rzędu 10% wystarczającą w zastosowaniach diagnostycznych.

Ponieważ PLD przybliża synchronizm sygnału u z cyklem nośnym, asynchroniczne z nim śladowe sygnały y ulegają osłabieniu a odpowiadające im prążki widma U , rozmyciu, jeśli zatem asynchronizm dotyczy sygnałów modulujących amplitudę wspomaganie okazuje się niecelowe (por. rys. 4.b).

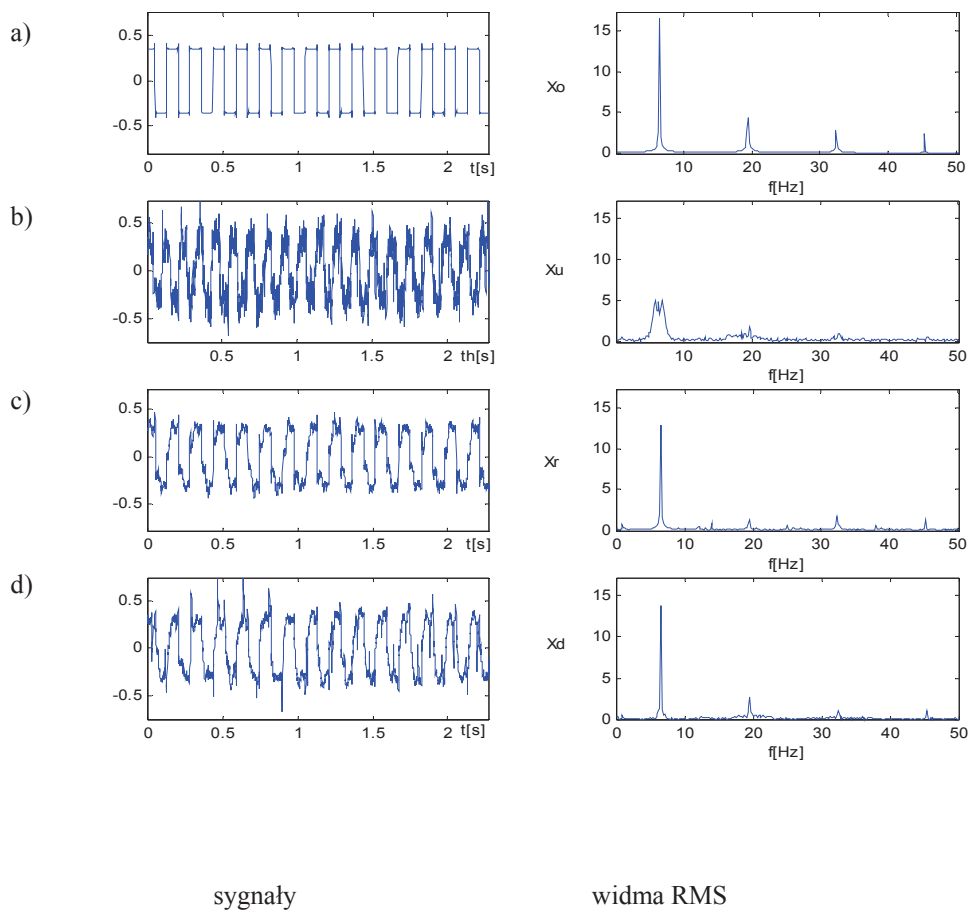
Błąd odtwarzania Θ_C powoduje fluktuacje reszkowe RF oceny x (por. np. rys. 3.c) i w rezultacie nieakceptowane obciążenie oceny wartości skutecznej rezultatu demodulacji PM.

Właściwy dobór parametrów PLD pozwala obniżyć częstotliwość FR poniżej F_X , co ułatwia ich zadowalające odfiltrowanie (por. rys. 4.b i 6. c).

5. DEMODULACJA DRGAŃ MASZYNY

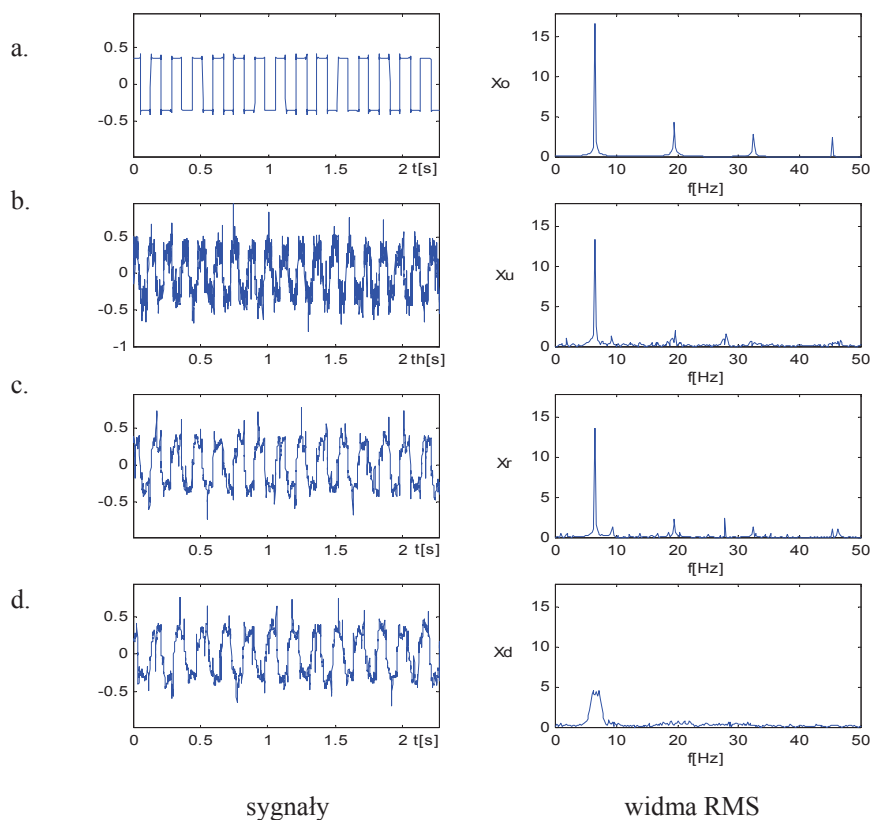
Tu sytuacja nie jest tak jednoznaczna, jak w przypadku symulacji. By PD miała sens trzeba najpierw odpowiedzieć na pytania:

- czy występuje modulacja i jaka?
- jaka cecha zmienności stanowi jej reprezentację w sygnałach, lub charakterystykach wyjściowych?
- czy częstotliwość nośna, ew. pasmo modulacji zlokalizowano trafnie?
- czy wstępna filtracja pasma domniemanej PM jest konieczna, użyteczna, zbędna?
- co przyjąć jako wynik referencyjny?



Rys. 4. Symulacja DAM sygnału modulowanego AM i PM falą prostokątną, $f_X = \text{const}$

- a. sygnał modulujący
- b. DAM, wspomaganie PLD;
- c. DAM sygnału referencyjnego, $f_C = \text{const}$;
- d. DAM, bez wspomagania



Rys. 5. Symulacja DAM sygnału modulowanego AM i PM falą prostokątną $\delta_x/\delta_c = 1$:

- sygnał modulujący;
- DAM, wspomaganie PLD;
- DAM sygnału referencyjnego, $f_c = \text{const}$;
- DAM, bez wspomagania

Ponieważ prezentacja rezultatów (rys. 7, 8 i 9) służy jedynie porównaniu efektów wspomaganie PLD z jego brakiem, pominięto skalowanie osi rzędnych w jednostkach bezwzględnych zachowując jedynie podobieństwo skali. Także wybór obiektu podyktowała dostępność i łatwość eksperymentowania. Selekcja pasma MSM nie sprawiała trudności (por. rys. 7). Wyniki dotyczą małego fragmentu rozbiegu (12 obrotów wałka referencyjnego) co odpowiada względnej zmianie cyklu referencyjnego ok. $-4,8\%$ (na cykl $\delta\Theta = 0,4\%$).

Mimo tak małej wartości $\delta\Theta$ uchyb obciążenia demodulacji PM okazuje się nieakceptowalny (rys.9). $\epsilon_2 = -426\%$. Natomiast dodatkowa filtracja HP fluktuacji resztkowych zmniejsza obciążenie o $\epsilon_1 = -16,4\%$.

W przypadku AM PLD poprawia nieco czytelność widma, natomiast zmiana RMS rezultatu jest pomijalna – $\epsilon_a = 5,18\%$ (rys. 8 a,b).

6. WNIOSKI

Pomimo prostoty samej procedury okazuje się PLD dość skutecznym narzędziem wspomagającym demodulację kąta, zwłaszcza, jeśli ten sam ruch jest cykliczną przyczyną zmian modulujących, jak też tych, które je przenoszą.

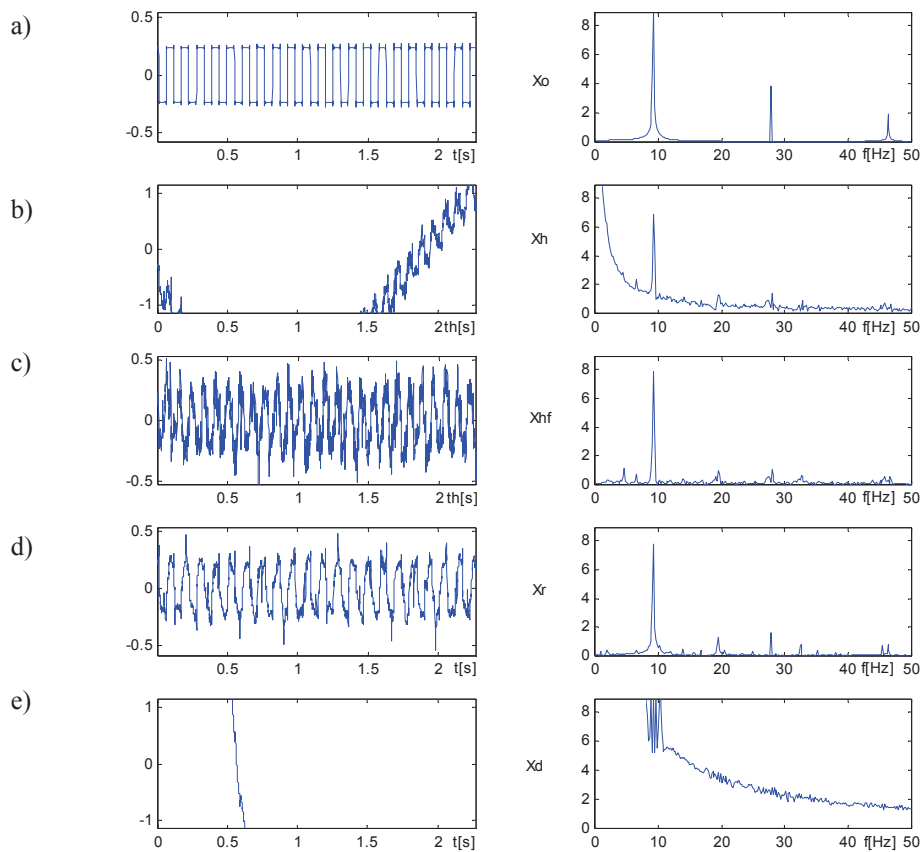
Jednakże, w przypadku PM, wspomaganie demodulacji przez PLD nie jest rozwiązaniem optymalnym, lecz kompromisowym.

asynchronizm kodowania sygnałów modulujących i nośnych AM powoduje nieskuteczność PLD. W pozostałych badanych przypadkach wspomaganie PLD pozwala uzyskać odtwarzanie RMS modulacji z błędem poniżej 10%.

DPM wymaga jeszcze na ogół filtracji fluktuacji resztkowych.

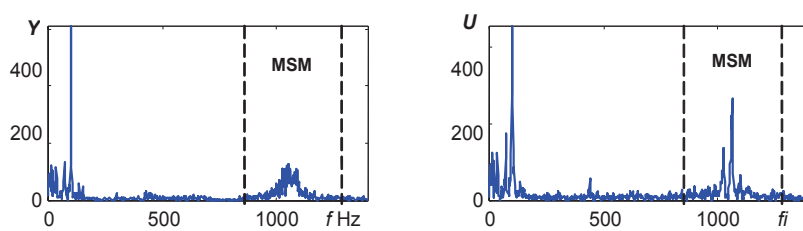
PLD ułatwia selekcję pasma modulacji.

Demodulatory wspomagane oparte o sygnał analityczny wymagają dużego nadpróbkowania (<100) przy rejestracji sygnału MS.



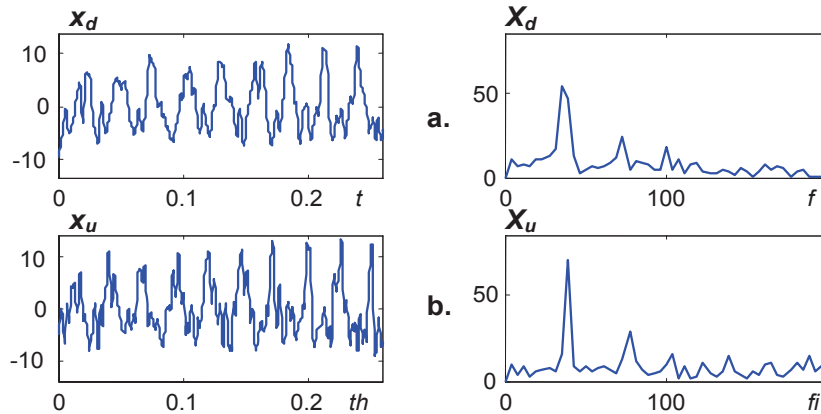
Rys. 6. Symulacja DPM sygnału modulowanego AM i PM falą prostokątną $\delta_M/\delta_C = 1$:

- a) sygnał modulujący;
- b) DPM, wspomaganie PLD;
- c) DPM, wspomaganie PLD; filtracja pasmowa;
- d) DPM sygnału referencyjnego, $f_c = \text{const}$;
- e) DPM, bez wspomagania



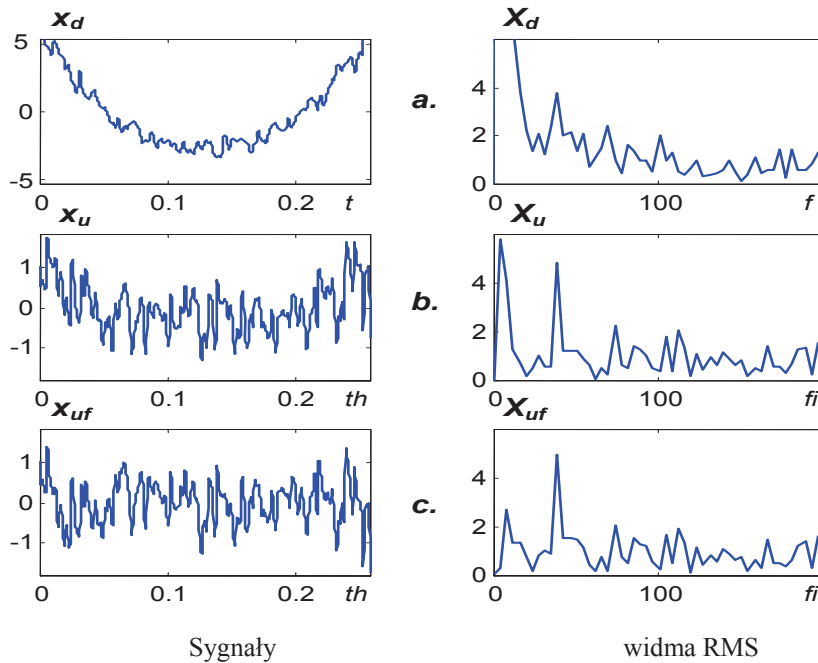
Rys. 7. Strefy domniemanej modulacji w widmie drgań przekładni:

- a) sygnał oryginalny;
- b) po transformacji PLD



Rys. 8. Wpływ wspomagania PLD na demodulację AM prędkości drgań przekładni $\delta_M/\delta_C = 1$:

- a) bez wspomagania;
 b) wspomaganie PLD



Rys. 9. Wpływ wspomagania PLD na demodulację PM prędkości drgań przekładni:

- a) bez wspomagania;
 b) wspomaganie PLD;
 c) wspomaganie PLD; filtracja HP

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Bigret R., Feron J. L.: *Diagnostic – maintenance disponibilite des machines tournantes*. Paris, Masson, 1995.
- [2]. Cioch W., Krzyworzeka P.: *Modulacje niezamierzone w diagnozowaniu głośnika*. Diagnostyka, vol. 28, 2003, 29 – 36.
- [3]. KRZYWORZEKA P., CIOCH W. *Machine diagnostics in cycle-time scale using linear decimation procedure*: 1st Int. Conf. on Experiments/Process/System.Modelling/Simulation/Optimization : 6–9 July, 2005 : book of abstracts / & CD-ROM Proc. — [1–6]. Univ. of Patras. LFME Athens, Greece.
- [4]. Haykin S: *Systemy telekomunikacyjne*. W-wa, WKiŁ, 1998.
- [5]. Krzyworzeka P.: *Demodulacja drgań maszyn przy zmianach prędkości obrotowej*. Diagnostyka, vol. 31, 2004, 21 – 28.
- [6]. Krzyworzeka P.: *Wspomaganie synchroniczne w diagnozowaniu maszyn*. Kraków-Radom. BPE, Wyd. ITE. 2004.

- [7]. Radkowski St.: *Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych*: W-wa, Radom, WITE, 2002.
- [8]. Piotrowski A., Stankiewicz A., Balunowski J., Solbut A.: *Diagnostics symptoms forming in the rotating machine monitoring based on the order tracking analysis*. II International Congress of Technical Diagnostics, Diagnostika'2000, Poland, Warsaw 19-22 September 2000.

Publikacja powstała w ramach projektu KBN
nr 4 T07B 05426

Ważniejsze symbole i skróty

| | | |
|-----------------|---|--|
| AM | – | modulacja amplitudy |
| IW | – | informacja wartościowa |
| MSM | – | modulacja sygnału maszyny |
| SW | – | sygnał wartościowy |
| SN | – | sygnał nośny |
| MS | – | sygnał modulowany |
| VSD | – | demodulacja sygnału drgań |
| PM | – | modulacja fazy |
| PDI | – | procedura identyfikacji diagnostycznej |
| PLD | – | procedura liniowej decymacji |
| PLL | – | pętla synchronizacji fazy (<i>Phase-locked loop</i>) |
| PPM | – | modulacja położenia impulsu |
| AM | – | modulacja amplitudy |
| MSM | – | modulacja sygnału maszyny |
| SW | – | sygnał wartościowy |
| SN | – | sygnał nośny |
| MS | – | sygnał modulowany |
| VSD | – | demodulacja sygnału drgań |
| $\psi(\Theta)$ | – | synchronizująca charakterystyka cyklu |
| ε | – | błąd względny |
| Φ_C | – | faza nośna |
| Φ_X | – | faza wartościowa |
| Φ_F | – | faza fluktuacji |
| Φ_T | – | faza trendu |
| Ω_C | – | częstość nośna |
| Θ_C | – | cykl nośny |
| x | – | sygnał modulujący |
| y | – | zmodulowany sygnał drganiowy |
| u | – | zmodulowany sygnał drganiowy po transformacji PLD |
| y_C | – | sygnał nośny |
| s_F | – | sygnał charakterystyczny |
| t | – | czas dynamiczny |
| T | – | przedział obserwacji sygnału |
| η | – | czas cyklu |
| g | – | czas eksploatacyjny |
| δ_Θ | – | względna zmiana cyklu |

Dr hab. inż. Piotr KRZYWORZEKA studiował na Wydziale Elektrotechniki AGH. Pracuje na tejże uczelni do dziś, obecnie jako prof. W Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki. Wykładał kilka lat w Algierii. Jest autorem ok. 100 publikacji, głównie o tematyce diagnostycznej, rzeczoznawcą SEP w zakresie elektroakustyki oraz członkiem PTDT od momentu jego powstania. Był wieloletnim sekretarzem Polskiej Sekcji *Audio Engineering Society*. Interesuje się także psychologią i filozofią. Jako środek transportu preferuje rower.

Dr inż. Witold CIOCH jest absolwentem Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa PRz., specjalność napędy lotnicze oraz Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, specjalność wibroakustyka. Obecnie pracuje jako adiunkt w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH. Autor 34 publikacji z tematyki diagnostyki technicznej i wibroakustyki. Zajmuje się zagadnieniami cyfrowego przetwarzania sygnałów, sieciami neuronowymi i analizą ryzyka eksploatacyjnego.