

## DEMODULACJA DRGAŃ MASZYN W SKALI CZASU SYNCHRONIZOWANEJ CYKLEM

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, lecz nie identycznych wartością okazać się może informacja o dynamicznych procesach resztkowych zawarta w modulacjach, zwłaszcza PPM. Procedurę demodulacji znacznie utrudnia zmiana cykli procesów kinematycznych w trakcie monitorowania. Opis sygnału w skali czasu synchronicznego z cyklem nośnym pozwala przybliżyć rozwiązanie problemu demodulacji kąta.

Słowa kluczowe: diagnostyka, synchronizm, demodulacja, decymacja.

### MACHINE VIBRATIONS DEMODULATION – CASE OF CYCLE SYNCHRONIZED TIME SCALE

#### Summary

Taking into account some particularities of machine modulation the paper is concerned with the possibility of Phase demodulation output biasing elimination. Especially rotating speed fluctuations or trend can affect demodulation procedure. Proposed time scale transformation called PLD aims to reduce demodulation RMS error due to monotonic trend of carrier frequency. New time scale is synchronized by short time mean cycle of reference rotation speed, supposed carrier. Some simulated examples are discussed.

Key words: diagnostics, synchronism decimation, demodulation.

#### 1. CZAS SYNCHRONIZOWANY CYKLEM

Prezentowane rozważania są kontynuacją publikacji [5], warto zatem przypomnieć (by rozszerzyć) ich wspólną przesłankę. Chodzi o skale czasu, w jakich informacja dla odbiorcy wartościowa staje się bardziej czytelna.

##### 1.1. Zegary użyteczne

Lokalne i globalne skale czasu wyznaczane są przez ciągi zdarzeń referencyjnych – zegary. Rola zegara, to generowanie zdarzeń porządkujących, organizujących inne ciągi zdarzeń. Regularny i nieregularny bieg czasu zależy od wyboru zegara, stąd celowym bywa. poszukiwanie zegara reprezentatywnego dla pewnego podzbioru zdarzeń np. momentów pomiaru procesu wibroakustycznego zawierającego informacje diagnostycznie cenną.

Skala czasu, w której:

- opis zmienności staje się prostszy,
- zachowane są istotne cechy zmienności informacyjnej,
- zmienność nieinformacyjna ulega redukcji, może ułatwiać diagnozowanie w zmiennych warunkach pracy.

Dla przedziału  $T$  obejmującego  $1, \dots, n, \dots, M$  cykli:  $\eta \in [0, mM]$ ,  $t \in [0, T]$ ,  $m$  – ilość rozróżnialnych

#### 1.2. Transformacje skali czasu

Rozważymy obiekty, w których ma miejsce powtarzanie oddziaływań elementów, lub mediów w ruchu. Sekwencja wybranego ciągu zdarzeń realizacji celu podstawowego [4, 6], powtarza się w interwałach czasowych określanymi mianem cyklu chwilowego  $\Theta$ . Kolejne realizacje  $\Theta_k$  nie są identyczne nawet w dobrym stanie technicznym i ustalonych warunkach pracy maszyny, (stąd ruch cykliczny nie stanowi tu synonimu okresowego)

Ruch cykliczny stwarza interesującą możliwość wyróżnienia oprócz upływających według rytmu zegara uniwersalnego czasów eksploatacyjnego  $\vartheta$  i dynamicznego  $t$ , różniących się jedynie mnożnikiem skali, także trzeciej kategorii – skali czasu względnego 'η', którego rytm wyznacza cykl  $\Theta$  – interwał czasowy kolejnych sekwencji [8]. Łączy go z czasem dynamicznym  $t$  zależność aproksymowana formułą (1):

$$\eta = n - 1 + \frac{t - \sum_{k=1}^{n-1} \varphi_k(\Theta)}{\psi_k(\Theta)} \quad (1)$$

momentów cyklu,  $\psi_k(\Theta)$  – charakterystyka cyklu chwilowego, jej trafny wybór może ułatwić

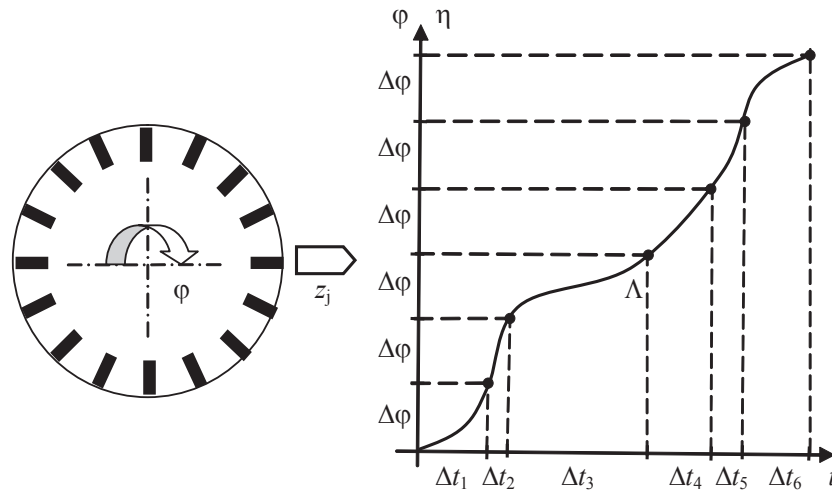
adaptacje skali 'η' dla danej kategorii metod odtwarzania zmienności wartościowej (por. rys. 2. b. i c.).

Jeśli ψ(Θ) reprezentuje operacje uśredniania, ma miejsce aproksymacja skali cyklu chwilowego, realizująca:

- dla uśredniania przedziałowego przybliżenie łamana,

- dla średniej ruchomej wygładzanie.

Zasadę transformacji skali czasu dynamicznego 't' na skalę synchronizowanego cyklem czasu 'η' przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Zasada transformacji czasu dynamicznego t na czas cyklu η w oparciu o pomiar kąta obrotu

Niech K ilością znaczników na 1 obrót – wówczas:

$$K\Delta\varphi = 2\pi = \sum_{k=1}^K \Omega_{tk} \Delta t_{tk} = \sum_{k=1}^K \frac{\Delta t_{tk}}{\Theta_{tk}} \quad (2)$$

$\Delta\varphi = \text{const}, \Delta t_k = \text{var}$

gdzie  $\Theta_{tk}$  = wartości chwilowe cyklu w momentach  $t_k$ ,

Zbiór zdarzeń referencyjnych  $\{z_k\}$  wyznaczają momenty  $t_k$  detekcji znaczników kąta obrotu (rys.1). Momenty te są jednocześnie referencyjne dla zegara odmierzającego czas cyklu chwilowego  $\Theta$

$$\{z_k\} \Rightarrow \{\eta_k\} = \{k\} \quad (3)$$

$\Delta\varphi \Rightarrow \Delta\eta \quad \{t_k\} \Rightarrow k\Delta\eta$

taktowanego równomiernie, jako że  $\Delta\varphi = \text{const}$ .

#### Zatem

zbiór K znaczników kąta obrotu wyznacza zbiór zdarzeń (momentów) referencyjnych zegara czasu rzędów.

Równoczesne im momenty czasu dynamicznego odpowiadają próbkowaniu niejednolitemu w skali 't' bowiem  $\Delta t_k = \text{var}$ .

Zegar czasu η jest synchronizowany cyklem chwilowym  $\Theta$ .

Zegar czasu t jest synchronizowany zegarem uniwersalnym.

Ich związek określa zależność

$$\frac{d\eta}{dt} = \Lambda \quad \Lambda = \frac{1}{\Theta} \quad (4)$$

Warto zauważyć, że liczba obserwowalnych momentów η jest w praktyce skończona, wartość K określa postulowany zakres widma rzędów [9].

Jej zwiększanie, nie zawsze bywa uzasadnione rzeczywistą potrzebą, utrudnia pomiar i przetwarzanie jego wyników. Potwierdzają to m.in. [6].

W praktyce, jak wskazują m. in. eksperymenty autorów rozważanie ciągłej natury η drogą interpolacji nie okazuje się celowe, choć teoretycznie możliwe.

Warte zainteresowania okazują się dwa przypadki:

Gdy ψ(Θ) odpowiada cyklowi chwilowemu  $\Theta$ , opis sygnału w dziedzinie częstotliwości przedstawia widmo rzędów wykorzystywane również w diagnozowaniu [9].

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].

Niedogodności powyższej pozwala w wielu przypadkach uniknąć liniowa aproksymacja monotonicznych zmian cyklu, wówczas:

$$\Theta_T(t) = \Theta_{ref} \left( 1 + \frac{\Delta_{\Theta}}{\Theta_{ref}} t \right) \quad (5)$$

Jej aplikacje praktyczną stanowi PLD. Dalej zbadamy jej przydatność dla poprawy skuteczności demodulacji kąta. Modułacja kąta PM jest wąskopasmową składową PPM [6,8].

## 2. SKALA CZASU DLA DEMODULACJI KĄTA

### 2.1. Trudności

Wiele badań szczegółowych [1,2,3] wskazuje na występowanie modulacji kąta i jej impulsowej wersji PPM już we wczesnych stadiach ewolucji uszkodzeń, natomiast dopiero zaawansowane zużycie (np. cierne i luz dla przekładni) dają zauważalny ogólny wzrost mocy widma całego sygnału drgań [8]. Nie wnikając w szczegóły, w każdym przypadku rezultaty demodulacji mogą stanowić wiarygodną bazę oceny stanu technicznego, jedynie wówczas, jeśli rezultat PDSM będzie estymatorem nieobciążonym i to w różnych stanach eksploatacyjnych.

Jednakże, jeśli prędkość obrotowa, a zatem i częstotliwość nośna nie są stałe, nieskuteczne okazują się metody demodulacji kąta opracowane i optymalizowane dla sygnałów nośnych określonej formy i stałej częstotliwości. Źródła obciążenia należy szukać w odtwarzaniu niewłaściwych składowych fazy chwilowej –  $\text{Arg}[Y(t)]$ .

### 2.2. Model fazy maszynowej modulacji kąta

Spróbujmy rozważyć, jakie warunki powinna spełniać transformacja skali czasu dynamicznego by na wyjściu dominowała zmienność informacyjna? Otóż o poprawności interpretacji rezultatów demodulacji oprócz metody decyduje przyjęty model fazy sygnału  $y$ . Rzeczywisty sygnał PPM jest ciągiem niepowtarzalnych impulsów o zmodulowanym położeniu [6,8]. Model PPM wskazuje na odtwarzanie przez modulację kąta każdej ze składowych harmoniki ciągu impulsów. Dalsze rozważania dotyczyć, zatem będą fazy chwilowej składowej harmonicznej PPM, z reguły pierwszej.

Właściwe modelowanie dotyczy, zatem samej fazy, w której należy generalnie wyróżnić cztery składowe (6) o różnej jakościowo zmienności i odmiennej, choć nie zawsze jednoznacznej interpretacji:

$$\text{Arg}[Y(jt)] = \Phi(t) = \Phi_C(t) + \Phi_X(t) + \Phi_F(t) + \Phi_T(t) \quad (6)$$

gdzie:

- $\Phi_C(t)$  – faza sygnału nośnego przy ustalonym cyklu  $\Theta_C$ ,
- $\Phi_T(t)$  – rezultat monotonicznej zmiany cyklu nośnego,
- $\Phi_X(t)$  – składowa informacyjna, tu odtworzenie zmienności DPR,
- $\Phi_F(t)$  – nieinformacyjne fluktuacje związane ze stanem eksploatacyjnym

W perspektywie czasu dynamicznego postępy procesów zużycia nie są na ogół mierzalne, zatem monotoniczny wypadkowy trend fazy  $\Phi_C + \Phi_T$  można przypisać nieinformacyjnej zmianie częstości nośnej.

Można je interpretować jako wynik transformacji skali czasu doprowadzającej proces nośny do stacjonarności w sensie stałości cyklu –  $\Theta_C = \text{const}$ .

Rozróżnienie fluktuacji  $\Phi_X$  od  $\Phi_F$  wymaga potraktowania indywidualnego. Wiernie odtwarzanie  $\Phi_X(t)$  nie zawsze jest konieczne i możliwe, brak bowiem referencji kształtu, a także przesłanek powtarzalności kolejnych realizacji, ze względu na losową naturę procesu DPR [3].

Reasumując, bazę użytecznej transformacji skali czasu ' $t \Rightarrow \eta$ ' powinien stanowić cykl nośny  $\Theta_C$ . Niestety w ogólnym przypadku nie istnieje postać drgań generowana specjalnie w tym celu. Drgania sygnał nośny  $y_0$  nie musi być tożsamy z kinematycznym, dynamicznym, lub innym elementem realizacji celu podstawowego maszyny.

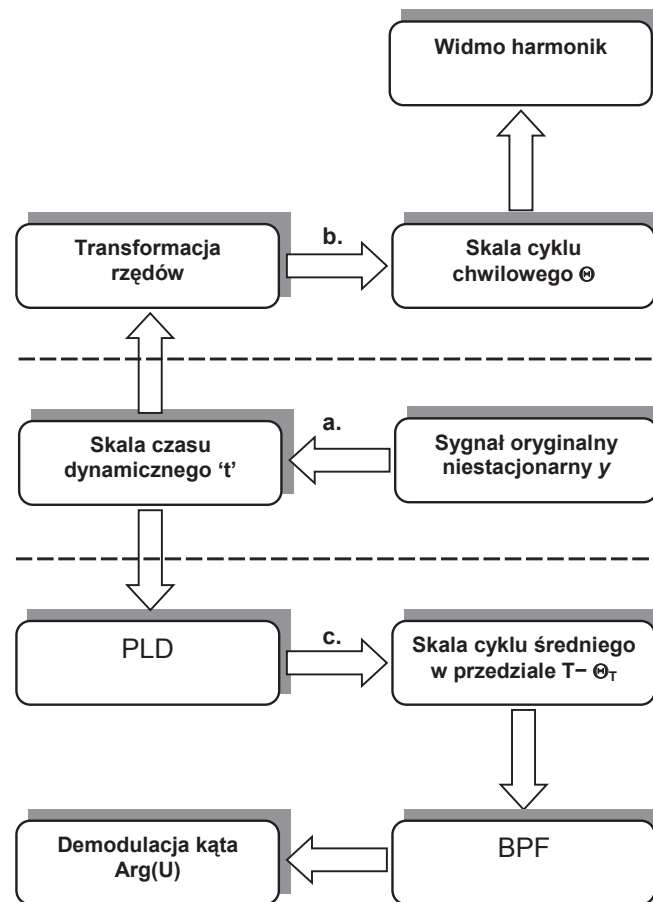
### 2.3. Aproksymacja krótko-terminowych trendów $\Theta_c$

W zastosowaniach praktycznych liniowy trend cyklu występuje rzadko, służy natomiast skutecznie jako model aproksymujący monotoniczną zmianę  $\Omega_C$  w przedziale obserwacji  $T$  [2,3,5] (por. także rys. 2c).

PLD realizuje transformację ' $t \Rightarrow \eta$ ' poprzez proporcjonalną selekcję próbek silnie nadpróbkowanego sygnału  $y$ .

Linia konwersji  $t \Rightarrow \eta$  staje się łamaną w przedziałach  $\Delta\eta_k = N_k \gg K$  (rys. 1). Nowa skala czasu jest synchronizowana cyklem  $\Theta_T$  bliskim, lecz nie tożsamym z  $\Theta_C$ . Rozwiązanie takie wiąże się z ryzykiem tworzenia fluktuacji pasożytniczych obciążających rezultat PPM, (co w przypadku wąskopasmowego sygnału nośnego odpowiada fazie  $\Phi_F$ ).

Dla wstępnego rozróżnienia składowych  $\Phi_F$  i  $\Phi_X$  można rozważyć selekcję częstotliwościową przynajmniej części udziału DPR.



Rys. 2. Możliwości reprezentacji sygnału niestacjonarnego w różnych skalach czasu:  
 a) czas dynamiczny, charakterystyki dwuparametrowe  
 b) czas rzędów, widma harmonik  
 c) czas cyklu średniego  $\Theta_T$ .

### 3. BADANIA SYMULACYJNE

#### 3.1. Cel i zakres

Podstawowa trudność badania demodulatora modulacji niezamierzonych stanowi na ogół nieznanie i niedostępność realnych sygnałów modulujących (realizacji wewnętrznych DPR), a także rodzaju modulacji. Model modulacji wąskopasmowymi procesami kinematycznymi dla konkretnej maszyny można uznać za przypadek najkorzystniejszy – wiadomo wtedy z grubsza, czego szukać [7].

Dla oceny skuteczności i porównania różnych procedur demodulacji, a także wzorcowania aparatury diagnostycznej pozostaje zatem symulacja wzorcowych sygnałów modulujących  $x_o$ . By umożliwić także wizualną ocenę rezultatów, wybrano najprostsze superpozycje sinusoid modulujące fazę sygnału o zmiennej (rys. 3a) i stałej (rys. 3b) częstotliwości nośnej  $\Omega_c$ .

Symulacje tu prezentowane miały przede wszystkim na celu ocenę skuteczności PLD w przybliżaniu cyklu nośnego.

Jako ilościowe kryterium oceny przyjęto błąd względny odtworzenia wartości skutecznej sygnału modulującego –  $x_o$

Jako demodulatora w czasie  $\eta$  użyto argumentu sygnału analitycznego  $Y$  lub  $U$ :

$$x_h = \text{detrend}\{\text{Arg}[Y(t)]\} \text{ dla czasu } t$$

$$s_h = \text{detrend}\{\text{Arg}[U(t)]\} \text{ dla czasu } \eta$$

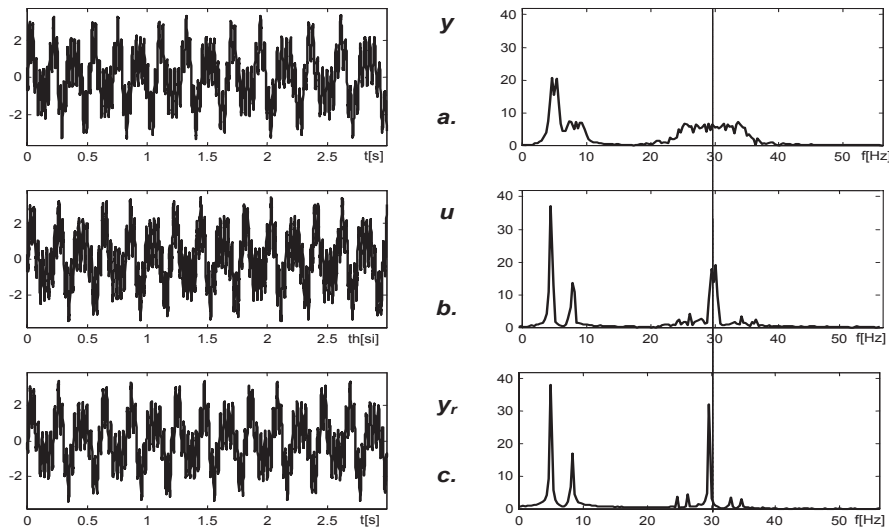
#### 3.2. Przykłady

Brak miejsca skłania do przedstawienia rezultatów typowych dla właściwego doboru parametrów PLD blisko zakresu stosowalności. Liniowy spadek częstotliwości nośnej w przedziale  $T$  wyniósł -40%. Fluktuacje resztkowe wyniku okazują się w większości wypadków nieakceptowalne (rys. 4b) i wymagają filtracji górno-przepustowej.

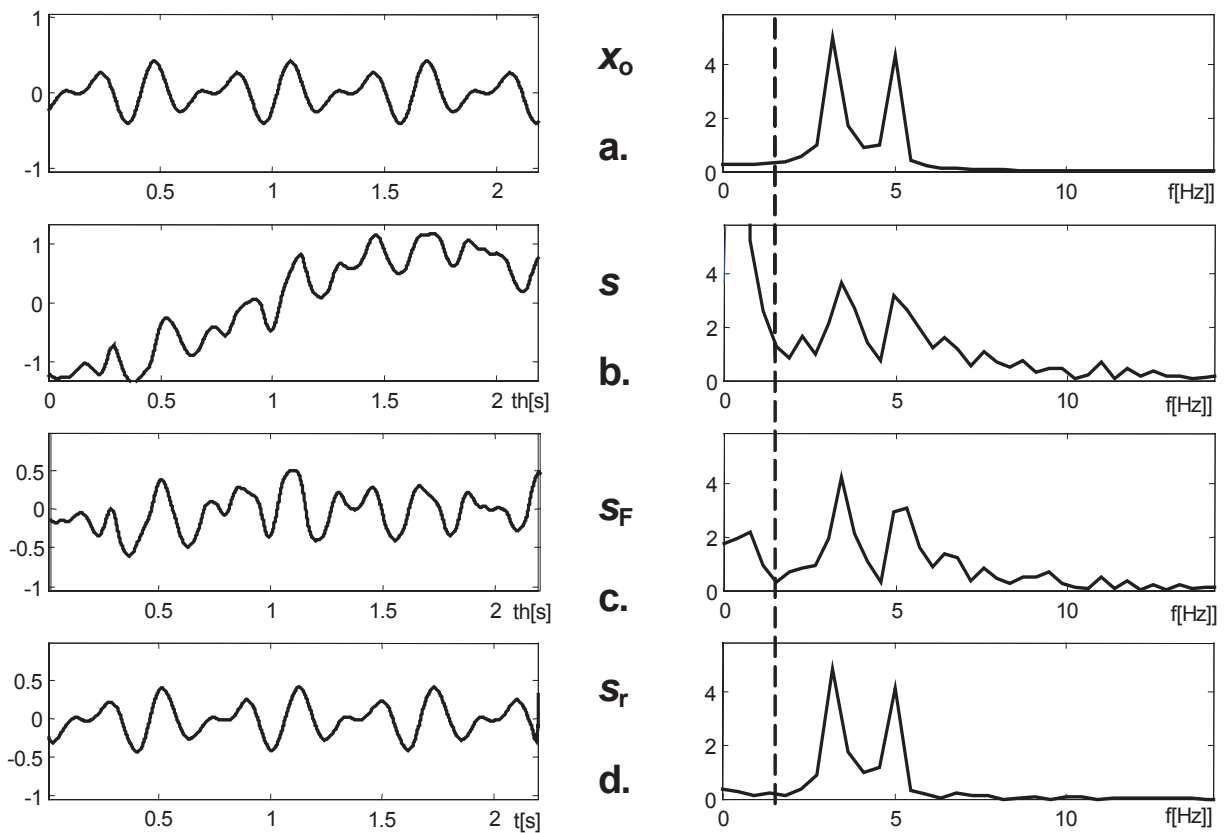
Kształt sygnału modulującego asynchronicznego względem skali ' $\eta$ ' nie jest odtwarzany poprawnie (rys. 4c), podobna uwaga

dotyczy widm. Odtwarzanie wartości skutecznej modulacji wypada lepiej jednak i tu z kilkunastoprocentowym błędem  $\delta_x$ . Alternatywny

demodulator PLL może być skuteczniejszy, zwłaszcza w odtwarzaniu kształtu (por. [4]).



Rys. 3. Sygnał zmodulowany PM  
 a) sygnał PM, liniowy spadek  $\Omega_C$   
 b) sygnał PM jw. po zastosowaniu PLD  
 c) sygnał PM, stała  $\Omega_C$



Rys. 4. Rezultaty demodulacji PM w dziedzinie czasu i częstotliwości  
 a) modelowy sygnał modulujący  
 b) liniowy spadek  $\Omega_C$ , wynik po PLD  $\delta_x = 293\%$   
 c) jw. dodatkowa filtracja dolnoprzepustowa  $\delta_x = 12,6\%$   
 d) wynik demodulacji, stała  $\Omega_C$ , bez PLD  $\delta_x = -2\%$

#### 4. UWAGI I WNIOSKI

Transformacja skali czasu poprzez decymację synchronizowaną cyklem (użycie PLD) pozwala na demodulację kąta z pewnymi ograniczeniami, bowiem:

- możliwe jest odtwarzanie wartości skutecznej ale nie kształtu sygnału modulującego,
- dobór parametrów PLD okazał się bardziej krytyczny, niż w przypadku harmonik cyklu podstawowego,
- sygnały asynchroniczne względem nowej skali czasu ulegają zniekształceniu.
- demodulacja PM jest tym skuteczniejsza, im lepiej cykl synchronizujący odtwarza cykl nośny,
- w zastosowaniu do modulacji niezamierzonych konieczne jest każdorazowa kalibracja procedury z wykorzystaniem sygnałów wzorcowych, a także filtracja pasmowa strefy modulacji.

Powyższe uwagi dotyczą demodulatora PM, który wykorzystuje argument sygnału analitycznego drgań

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1]. Bigret R., Feron J. L.: *Diagnostic – maintenance disponibilite des machines tournantes*. Paris, Masson, 1995
- [2]. Cioch W., Krzyworzecka P.: *Modulacje niezamierzone w diagnozowaniu głośnika*. Diagnostyka, vol. 28, 2003, 29 – 36
- [3]. Cioch W., Krzyworzecka P.: *Dynamiczna kompensacja wpływu zmian długości cyklu na sygnał drganiowy*. Mat XXVII Sympozjum Diagnostyka Maszyn, z. 1.
- [4]. Haykin S: *Systemy telekomunikacyjne*. W-wa, WKiŁ, 1998
- [5]. Krzyworzecka P.: *Demodulacja drgań maszyn przy zmianach prędkości obrotowej*. Diagnostyka, vol. 31, 2004, 21 – 28
- [6]. Krzyworzecka 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]. Sobkowski J.: *Częstotliwościowa analiza sygnałów*. W-wa, Wyd. MON, 1975
- [9]. 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.

#### 6. WAŻNIEJSZE OZNACZENIA I SKRÓTY

DSDM – demodulacja sygnału drganiowego maszyny

DPR – dynamiczny proces resztkowy

PLD – procedura liniowej decymacji

PM – modulacja fazy

PPM – modulacja położenia impulsów

SNR – stosunek sygnału do szumu

$\delta_X$  – błąd względny RMS

$\Phi_C$  – faza nośna

$\Phi_X$  – faza wartościowa

$\Phi_F$  – faza fluktuacji

$\Phi_T$  – faza trendu

$\Omega_C$  – częstość nośna

$\Theta_C$  – cykl nośny

$\Theta_T$  – średni krótkoterminowy

$x_0$  – referencyjny sygnał modulujący

$x_2$  – wysokoczęstotliwościowy sygnał wymuszenia (modulowany)

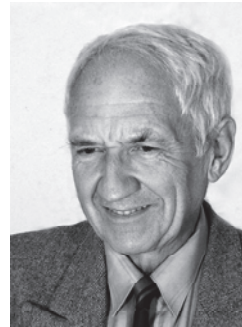
$x_h$  – rezultat demodulacji fazy jako argumentu sygnału analitycznego

$y$  – zmodulowany sygnał drganiowy, trend nośnej

$y_r$  – jw., lecz bez trendu

Pracę zrealizowano w ramach projektu KBN nr 4 T07B 05426

Dr hab. inż. Piotr KRZYWORZEKA, prof. AGH



pracuje na tej uczelni od ukończenia studiów. Wykładał kilka lat w Algierii. Jest autorem ok. 90 publikacji, głównie o tematyce diagnostycznej, rzeczoznawcą SEP w zakresie elektroakustyki, a także członkiem PTDT od momentu jego powstania. W pracy badawczej

preferuje podejście sygnałowe. 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.