

PLD WE WSPOMAGANIU DEMODULACJI ROZRUCHOWYCH DRGAŃ MASZYN

Witold CIOCH, Piotr KRZYWORZEKA
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki AGH
krzyworz@agh.edu.pl

Streszczenie

Opis sygnałów drganiowych maszyn wirujących przy monotonicznych zmianach prędkości obrotowej można znacznie uprościć wykorzystując czas taktowany cyklicznymi procesami kinematycznymi. Taką możliwość oferuje transformacja PLD pozwalająca wykorzystać charakterystyki właściwe sygnałom stacjonarnym. Jej zastosowanie prowadzi do zadawalającego zmniejszenia obciążenia wyniku już w przypadku prostego asynchronicznego demodulatora fazy. Przedstawiono przykładowe wyniki dla realnych sygnałów rozruchowych, a także występujące problemy i ograniczenia.

Słowa kluczowe: diagnostyka, demodulacja fazy, synchronizm.

PLD AIDED DEMODULATION OF STARTING VIBRATIONS IN ROTATING MACHINERY

Summary

Taking into account some particularities of rotating machinery signal modulation the paper is concerned with the possibility of PLD aided output biasing elimination. Especially rotating speed fluctuations or trend can affect demodulation procedure due to nonlinear trend of carrier frequency. Proposed time scale transformation, called procedure of linear decimation – PLD, aims to reduce demodulation error using linear approximation of carrier cycle short-term changes. Some examples of real starting signal asynchronous demodulations are presented and discussed.

Keywords: diagnostics, phase demodulation, synchronism.

1. WSTĘP

Właściwy wybór skali czasu dla opisu procesów drganiowych maszyny może poprawić czytelność niezamierzonej modulacji kąta, a w konsekwencji ułatwić rozpoznawanie wczesnych stadiów ewolucji uszkodzeń. Wspomaganie PLD dotyczy demodulacji drgań maszyn, dla których realizacja celu podstawowego wiąże się z cyklicznym powtarzaniem sekwencji zdarzeń podobnych, lecz nie identycznych.

Obejmuje wybrane kategorie modulacji czasu rzeczywistego (tu modulację fazy PM) w niestacjonarnych stanach eksploatacyjnych powodowanych monotoniczną zmianą cyklu roboczego.

2. MODULACJE NIEZAMIERZONE

Wiele badań szczegółowych [3, 4, 6, 8], w tym rozważania modelowe, wskazuje na występowanie modulacji już we wczesnych stadiach ewolucji niskoenergetycznych procesów resztkowych, natomiast dopiero zaawansowane stadia zużycia (np. cierne i luz dla przekładni) dają zauważalny ogólny wzrost mocy widma całego sygnału drgań).

Dla wielu kategorii uszkodzeń rezultat demodulacji dostarcza informacji diagnostycznej wcześniej, w prostszej formie i przy zmniejszonej wrażliwości na zakłócenia. Te ostatnie w znacznej mierze stwarza zmienny cykl roboczy maszyny w nieustalonych stanach eksploatacyjnych.

Modulację sygnału drgań maszyny cyklicznej można przypisać desynchronizacji ciągu impulsów siły przez dynamiczny proces resztkowy [7]. Analiza fenomenu sugeruje modulację położenia cyklicznie powtarzanych impulsów siły PPM jako najbardziej wrażliwą na zmiany innowacyjne wczesnych stadiów zużycia.

Rozważana PPM nie stanowi prostego odpowiednika zamierzonej, gdyż w maszynie sygnał nośny i sygnał informacyjny nie są znane w sensie założonej formy zmienności. Ponadto, obecność modulacji związana jest ze skalą czasu (por. rys. 1), bowiem:

- w skali czasu dynamicznego występuje zakłócające działanie zmian cyklu roboczego
- trafny wybór stwarza najkorzystniejsze warunki DSDM eliminując wpływ (a),
- synchronizacja zegara PLD cyklem chwilowym Θ_k eliminuje modulacje.

3. WYBÓR ZEGARA PLD

Pomijając szczegóły (wielokrotnie opisywane, np. [6-7]), 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,

Transformacja pozwala w przedziałach monotonicznych zmian cyklu roboczego zredukować niestacjonarność sygnału w stopniu umożliwiającym stosowanie prostszych metod analizy (np. widmowej) raz procedur demodulacji właściwych sygnałom stacjonarnym.

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

Gdy $\psi(\Theta)$ odpowiada cyklowi chwilowemu Θ , opis sygnału w dziedzinie częstotliwości przedstawia widmo rzędów wykorzystywane również w diagnozowaniu [9] (zegar czasu referencyjnego, rys. 1 b). Widma rzędów cechuje dobra rozdzielczość i dynamika.

Ich estymacja natomiast wymaga złożonych obliczeń i precyzyjnego pomiaru fazy (położenia).

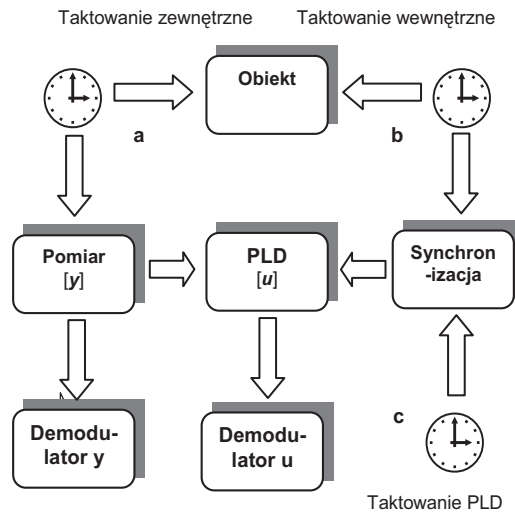
Ponadto w tak zdefiniowanej skali 'η' tracona jest informacja o fluktuacjach cyklu, które mogą być wynikiem modulacji PPM drgań przez dynamiczne procesy resztkowe, cenne źródło wczesnej informacji diagnostycznej [8].

Zatem w stanach niestacjonarnych demodulacja składowych PPM powinna być wspomagana przez transformację skali czasu zachowującą wartościową składową fluktuacji częstotliwości chwilowej,

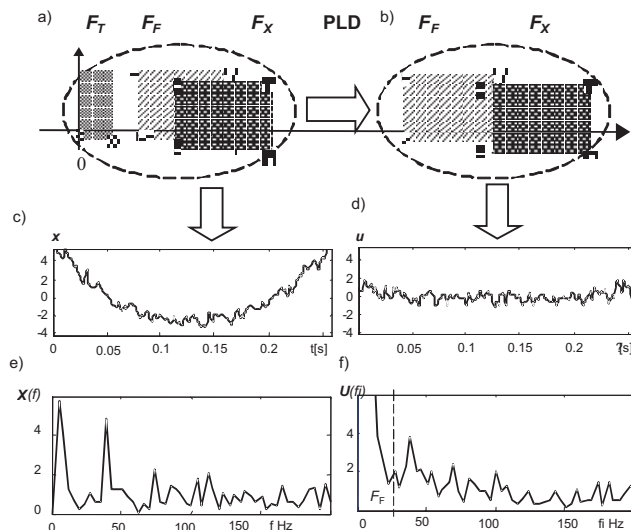
a redukującą monotoniczny trend cyklu nośnego $\Theta_C(\eta)$. Postulaty powyższe spełnia w przybliżeniu liniowa aproksymacja monotonicznych zmian cyklu nośnego (zegar c, rys. 1) [7]. Wówczas w przedziale T:

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

Δ_{Θ} – przyrost cyklu w przedziale aproksymacji T.



Rys. 1. Dyspozycja zegarów we wspomaganii demodulacji: a) zegar czasu rzeczywistego, b) zegar cyklu referencyjnego, c) zegar cyklu aproksymującego



Rys. 2. Demodulacja fazy – rozdział częstotliwościowy składowych fazy chwilowej: przed (a) i po (b) transformacji PLD sygnału zmodulowanego y ; c) F_D – trend częstotliwości obrotowej (i nośnej $\Rightarrow f_C$) w przedziale T, d) F_F – pasmo częstotliwości odpowiadające zakłócającym fluktuacjom fazy Φ_F , e) F_E – pasmo częstotliwości sygnału modulującego Φ_X , f) F_X – pasmo częstotliwości modulacji (maksymalne użyteczne)

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.

Skuteczność wspomaganii warunkuje także model fazy PM.

4. MODEL FAZY MODULACJI KĄTA

W pewnych przypadkach niestacjonarności eksploatacyjnej maszyny, kiedy prędkość obrotowa, a zatem i częstotliwość nośna nie są stałe, źródeł błędów obciążenia rezultatu demodulacji kąta 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:

$\Phi_C(t)$ – faza sygnału nośnego przy ustalonym cyklu Θ_C ,

$\Phi_T(t)$ – trend monotoniczny wywołany zmianą cyklu nośnego,

$\Phi_X(t)$ – składowa informacyjna, tu otworzenie zmienności DPR,

$\Phi_F(t)$ – nieinformacyjne fluktuacje związane ze stanem eksploatacyjnym, lub niedopasowaniem PLD.

Pasma częstotliwości odpowiadające pochodnym składowych 1, ... 4 powinny być rozłączne, ale nie zawsze są (por. rys. 2).

Całkowita separacja pasm F_X i F_F nie zawsze bywa możliwa, ani potrzebna.

Założenia modelowe, lub wyniki PID pozwalają wstępnie oszacować interesujący fragment pasma modulacji. Może on obejmować także nisko-częstotliwościowe fluktuacje nie spowodowane zmianą prędkości obrotowej.. Selekcje należy uznać za zadawalającą, jeśli potrafimy znaleźć charakterystykę $\varphi[x]$ umożliwiającą łatwą separację. Jak się okazuje wspomaganie PLD bywa tu pomocne – przebieg w skali czasu cyklu nośnego (rys 2. b) spełnia powyższy postulat w odniesieniu do widm [3].

Właściwie dobrana charakterystyka $\psi(\Theta)$ redukuje Φ_T na co wskazuje choćby porównanie sygnałów a i b, rys. 2 (nie zawsze niestety w stopniu wystarczającym).

5. DEMODULATOR

Transformacja skali czasu PLD pozwala dla wyodrębnienia fazy sygnału zmodulowanego wykorzystać dogodnie narzędzie formalne opisu stanów ustalonych sygnałów wąskopasmowych – sygnał analityczny $Y(jt)$.

Jego argument reprezentuje fazę całkowitą:

$$\Phi(t) = \text{Arg}[Y(j)] \quad (2)$$

Metoda nie wymaga dostępności, ani odtwarzania określonej formy sygnału nośnego y_C . jest za to wrażliwa na zakłócenia, zwłaszcza od innych modulacji, wymaga zatem selekcji strefy domniemanej modulacji badanej droga filtracji pasmowej.

Dzięki PLD usunięcie trendu liniowego eliminuje składową nośną, natomiast rozgraniczenie $\Phi_X(t)$ i $\Phi_F(t)$ zależy każdorazowo od warunków eksperymentu i wymaga obróbki finalnej (postprocessingu) u .

Operacja detrend eliminuje Φ_C

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

$$u \Rightarrow \Phi_u = \text{detrend}\{\text{Arg}[U(\eta)]\} \text{ dla skali } '\eta'$$

6. DEMODULACJA W PRAKTYCE

6.1. Rozpoznanie

Skuteczność i użyteczność demodulacji sygnału drgań maszyny zależy od odpowiedzi na pytania:

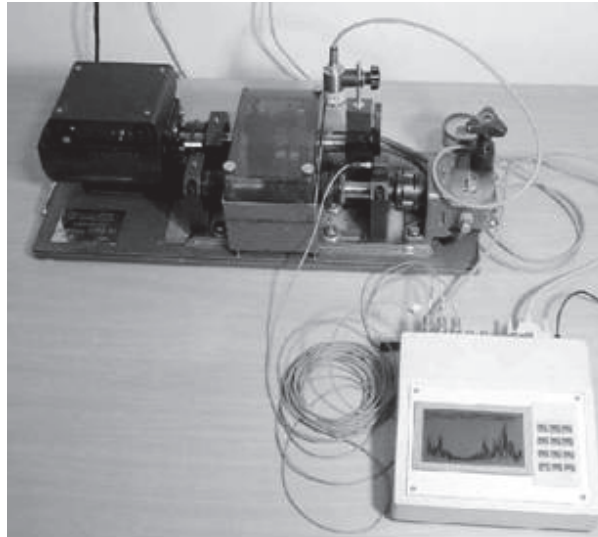
- czy występuje modulacja i jaka?
- jaka cecha zmienności stanowi jej reprezentację w sygnałach, lub charakterystykach wyjściowych?
- czy częstotliwość nośną, ew. pasmo modulacji zlokalizowano trafnie?
- czy i jaki rodzaj finalnej obróbki rezultatu PD jest celowy?
- co przyjąć jako wynik referencyjny?

6.2. Obiekt

Wybór obiektu podyktowała dostępność i łatwość eksperymentowania w warunkach laboratoryjnych. Surową prostotę stanowiska widać na rys. 3. Wykorzystano sprzętową realizację PLD (rys. 3) dla tworzenia banku modulacji w stanach rozbiegu i wybiegu malej przekładni przy różnych stanach zazębenia.

6.3. Kryteria oceny

Brak sygnałów referencyjnych a także niezerowa w przedziale T ocena wartości średniej fluktuacji zakłócających skłania do wyboru odchylenia standardowego S dla oceny przydatności postprocessingu w dziedzinie czasu. Realizacja o minimalnym S służyć może wówczas za referencyjna w ocenie obciążenia pozostałych (patrz tab. 1).



Rys. 3. Badana przekładnia laboratoryjna ze sprzętowym analizatorem PLD

W praktyce, jeśli tor pomiarowy nie przenosi składowej stałej, można zastąpić S wartością skuteczną RMS:

$$\varepsilon_1 = (S_X - S_{ud})/S_{ud} \text{ 100\%} \quad \text{bez wspomagania}$$

$$\varepsilon_2 = (S_{uo} - S_{ud})/S_{ud} \text{ 100\%} \quad \text{PLD, wynik}$$

bezpośredni

$$\varepsilon_3 = (S_{uf} - S_{ud})/S_{ud} \text{ 100\%} \quad \text{filtracja HP}$$

Zamieszczone w tabeli 1 uchyby względne pozwalają ocenić:

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

Tabela 1. Uchyby względne

| | S_X | S_{uo} | S_{uf} | S_{ud} |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|
| S | 65,2 | 3,68 | 1,16 | 0,662 |
| $\varepsilon\%$ | 9740 | 455 | 74 | – |
| | ε_1 | ε_2 | ε_3 | |

6.4. Wybrane rezultaty

Tu prezentacja rezultatów (rys. 4 i 5) służy jedynie porównaniu efektów wspomagania PLD z jego brakiem, stąd pominięto skalowanie osi rzędnych w jednostkach bezwzględnych zachowując jedynie podobieństwo skali.

Działanie PLD w dziedzinie częstotliwości dobrze ilustruje rys. 4 a i b.

Ponieważ PLD przybliży synchronizm sygnału u z cyklem nośnym, asynchroniczne z nim śladowe

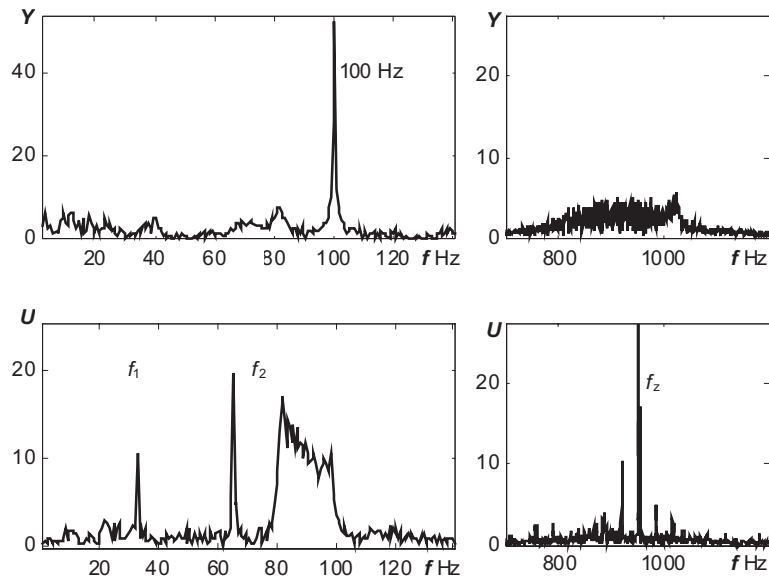
sygnały y ulegają osłabieniu a odpowiadające im prążki widma U , rozmyciu, jeśli zatem asynchronizm dotyczy sygnałów modulujących amplitudę wspomaganie okazuje się niecelowe (por rys. 4.b).

Skuteczność PLD w istotnych dla PM strefach widma harmoniki obrotów oraz częstotliwości zazębienia przedstawia rys. 4 b. Po PLD prążki harmoniki obrotów, oraz prążki wokół częstotliwości zazębienia stają się wyraźnie widoczne, co nie przesądza jeszcze o obecności i rodzaju modulacji a jedynie umożliwia demodulację z wykorzystaniem $\text{Arg}(Y)$. Przykładowe rezultaty demodulacji zestawia rys. 5.

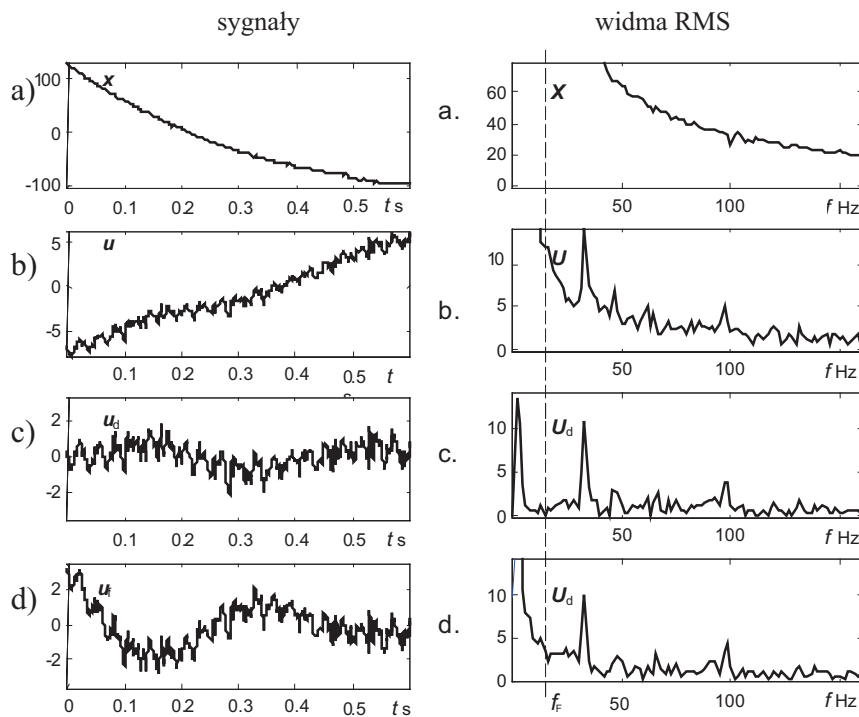
Bez modelu modulatora ocena rezultatu demodulacji rzadko bywa łatwa i jednoznaczna. Warunkiem wstępnym jest wzorcowanie toru demodulacji z wykorzystaniem modelowych sygnałów testowych o podobnej kategorii i stopniu niestacjonarności cyklu nośnego w przedziale liniowej aproksymacji PLD. Opis procedur tego typu znajdzie czytelnik w pracach [6, 7].

Wyniki demodulacji przedstawione na rys. 5 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 bezpośredniej demodulacji PM okazuje się nieakceptowany (rys. 5a).



Rys. 4. Widma prędkości drgań przy rozbiegu – strefy harmoniki obrotów (f_1, f_2) oraz częstotliwości zazębienia f_z sygnał oryginalny po transformacji PLD



Rys. 5. Rezultaty demodulacji fazy (sygnał z rys. 4): a) sygnał oryginalny, b) po transformacji PLD, c) finalne usunięcie trendu liniowego, d) finalna filtracja górnoprzepustowa

Błąd odtwarzania Θ_C powoduje fluktuacje reszkowe F_R oceny x (por. np. rys. 5.a) i w rezultacie nieakceptowane obciążenie oceny wartości skutecznej rezultatu demodulacji PM. tab. 1). Jednak, jak to widać na rys. 5 b, PLD nie usuwa tej wady całkowicie.

Właściwy dobór parametrów PLD pozwala obniżyć górną granicę pasma częstotliwości F_R poniżej F_X , co ułatwia ich separację i selekcję w dziedzinie częstotliwości (por. rys. 5.b, c i d).

7. UWAGI I WNIOSKI

PLD okazała się dość skutecznym narzędziem umożliwiającym demodulację kąta, w stanach rozruchowych.

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

Ponadto wspomaganie PLD:

- poprawia czytelność widma sygnału zmodulowanego;
- ułatwia lokalizację domniemanych modulacji w widmie sygnału;
- pozwala na użycie prostych asynchronicznych demodulatorów fazy;
- ułatwia selekcję informatywnych składowych rezultatu demodulacji;
- zmniejsza obciążenie wyniku, (ale nie całkiem);
- preferuje prezentację i interpretację wyniku w dziedzinie częstotliwości.

Pozostaje jednak niejednoznaczność interpretacji pojedynczego rezultatu wywołana nieznaną modulatora i oryginalnego sygnału modulującego.

Demodulatory wspomagane wymagają dużego nadpróbkowania (<100) przy rejestracji oryginalnego sygnału PM. Sprzętowa implementacja PLD czyni ten wymóg niekłopotliwym.

8. 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, s. 29 – 36.
- [3]. Cioch W. Krzyworzecka P.: *PLD we wspomaganii demodulacji drgań maszyn*. Diagnostyka, vol. 2(38)/2006, s. 199 – 210.
- [4]. Gębura A., Tokarski T.: *The diagnostic of technical condition of turbine engine's Bering by means of method of alternator frequency modulation*.
- [5]. Haykin S.: *Systemy telekomunikacyjne*. W-wa, WKiŁ, 1998.

- [6]. Krzyworzecka P., Adamczyk J., Cioch W., Jamro E.: *Monitoring of nonstationary states in rotating machinery*: Kraków-Radom. BPE, Wyd. ITE. 2006.
- [7]. Krzyworzecka P.: *Wspomaganie synchroniczne w diagnozowaniu maszyn*. Kraków-Radom. BPE, Wyd. ITE. 2004.
- [8]. Radkowski St.: *Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych*. W-wa, Radom, WITE, 2002.
- [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, Diagnostyka'2000, Poland, Warsaw 19-22 September 2000.

9. WAŻNIEJSZE SYMBOLE I SKRÓTY

| | | |
|-----------------|---|---|
| DPR | – | dynamiczny proces resztkowy |
| IW | – | informacja wartościowa |
| MSM | – | modulacja sygnału maszyny |
| SDM | – | sygnał drganiowy maszyny |
| SN | – | sygnał nośny |
| MS | – | sygnał modulowany |
| PM | – | modulacja fazy |
| PDI | – | procedura identyfikacji diagnostycznej |
| PLD | – | procedura liniowej decymacji |
| PPM | – | modulacja położenia impulsu |
| SW | – | sygnał wartościowy |
| SN | – | sygnał nośny |
| MS | – | sygnał modulowany |
| $\psi(\Theta)$ | – | synchronizująca charakterystyka cyklu |
| Φ_C | – | faza nośna |
| Φ_X | – | faza wartościowa |
| Φ_F | – | faza fluktuacji |
| Φ_T | – | faza trendu |
| Θ_C | – | cykl nośny |
| x | – | rezultat demodulacji |
| y | – | zmodulowany sygnał drganiowy |
| u | – | zdemodulowany 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 |