

UŚREDNIANIE MULTISYNCHRONICZNE (MSA) DIAGNOSTYCZNIE ZORIENTOWANA METODA ANALIZY SYGNAŁU WIBROAKUSTYCZNEGO

Roman BARCZEWSKI

Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej
ul. Piotrowo 3, 60-965, Poznań, e-mail:Roman.Barczewski@put.poznan.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono technikę *Uśredniania Multisynchronicznego (MSA)* - diagnostycznie zorientowaną metodę przetwarzania sygnału. Metoda *MSA* jest szczególnie przydatna do analizy drgań poliokresowych generowanych przez niektóre typy maszyn. Technika ta pozwala na równoległą separację składowych poliharmonicznych ze złożonych sygnałów drganiowych. Dalsze przetwarzanie zdekomponowanych poliharmonik daje szerokie możliwości zastosowań diagnostycznych. W artykule zarysowano algorytm metody oraz przykład jej zastosowania do analizy drgań przekładni zębatej.

Słowa kluczowe: Uśrednianie multisynchroniczne, diagnostyka wibroakustyczna, metody analizy sygnałów poliharmonicznych i poliokresowych

MULTISYNCHRONOUS AVERAGING (MSA) A DIAGNOSTIC-ORIENTED METHOD OF VIBROACOUSTIC SIGNAL ANALYSIS

Summary

In the paper the *Multisynchronous Averaging (MSA)* a diagnostic – oriented signal processing method has been presented. The *MSA* technique is especially useful for analysis of polyperiodic vibration signals generated by some types of machines. This method enables parallel separating of polyharmonic component from complex vibration signal. Postprocessing of decomposed polyharmonics gives wide possibilities of diagnostic applications. In the paper an algorithm of the *MSA* techniques has been outlined and example of application of the method to gear box vibration analysis has been presented.

Keywords: *Multisynchronous Averaging (MSA)*, vibroacoustic diagnostics, methods of a polyharmonic and polyperiodic signal analysis

1. WSTĘP

Większość złożonych pod względem kinematycznym maszyn i urządzeń jest źródłem sygnałów wibroakustycznych (WA) o charakterze poliharmonicznym i poliokresowym.

Pod pojęciem *sygnału poliharmonicznego (polyharmonic signal - PHS)* będziemy rozumieli złożony sygnał okresowy, który oprócz składowej podstawowej o częstotliwości f_p , związanej z częstotliwością charakterystyczną dla danego podzespołu lub procesu, zawiera jej składowe nadharmoniczne o częstotliwościach $n \cdot f_p$ ($n = 1, 2, 3, \dots$). Reprezentacją sygnału poliharmonicznego w dziedzinie częstotliwości jest *poliharmonika* - specyficzna postać widma tworząca ciąg składowych widma h_n ($n=1, 2, \dots, N$), związanych z jedną, częstotliwością podstawową f_p .

Sygnał poliokresowy (polyperiodic signal - PPS) jest sygnałem składającym się co najmniej z dwóch sygnałów poliharmonicznych, o różnych częstotliwościach podstawowych $f_{p,i}$, nie będących wzajemnie swoimi nad- lub pod wielokrotnościami.

Źródłami sygnałów poliharmonicznych mogą być między innymi: oddziaływania dynamiczne wirujących części maszyn, zjawiska elektromagnetyczne występujące w silnikach elektrycznych, niektóre zjawiska aero- i hydrodynamiczne zachodzące w maszynach przepływowych oraz procesy o charakterze impulsowym powtarzające się ze stałym okresem. Obecność w maszynie co najmniej dwóch źródeł drgań o różnych okresach podstawowych powoduje powstawanie poliokresowych sygnałów wibroakustycznych. Złożone sygnały WA tego typu generują m.in. przekładnie pasowe i przekładnie zębate o przełożeniu różnym od jedności, maszyny wielowirnikowe z wirnikami obracającymi

z różnymi prędkościami obrotowymi, silniki asynchroniczne itp. Poliokresowe sygnały poliharmoniczne mogą być również generowane przez łożyska toczne w przypadku np. koegzystencji defektów dwóch różnych jego elementów.

Dla celów diagnostyki WA opracowano i adoptowano wiele technik i metod analizy sygnałów. Niektóre z nich znalazły zastosowanie do analizy sygnałów PPS i PHS. Można do nich zaliczyć: analizę cepstralną [10], widmo iloczynowe, widmo poliharmoniczne [5]. Cechy i ograniczenia tych metod, a zwłaszcza postacie uzyskiwanych wyników sprawiają trudności w ich interpretacji i dokonaniu oceny ilościowej. W praktyce stosowane są zazwyczaj do identyfikacji zjawisk i ich oceny jakościowej.

Do oceny zarówno jakościowej jak i ilościowej przydatne są diagnostycznie zorientowane metody przetwarzania i analizy sygnału, dające wyniki w postaci pozwalającej na łatwą i intuicyjną ich interpretację. Do ekstrakcji i dalszej analizy sygnałów poliharmonicznych z sygnałów złożonych lub zaszumionych stosowane są techniki synchronicznego przetwarzania sygnałów [1] np. uśredniania synchronicznego (*synchronous averaging*) [6], czy też analiza rzędów (*order analysis*) [7], która jest szczególnie przydatna w analizie stanów nieustalonych (np. rozruchu i wybiegu maszyny). Do analizy stacjonarnych sensie częstotliwościowym złożonych sygnałów PHS i PPS z powodzeniem można stosować metodę poliharmonicznej filtracji rekurencyjnej PRF [3,4,5], a dla sygnałów niestacjonarnych techniki filtracji śledzącej (np. *Vold-Kalman Order Tracking Filtering* [8]).

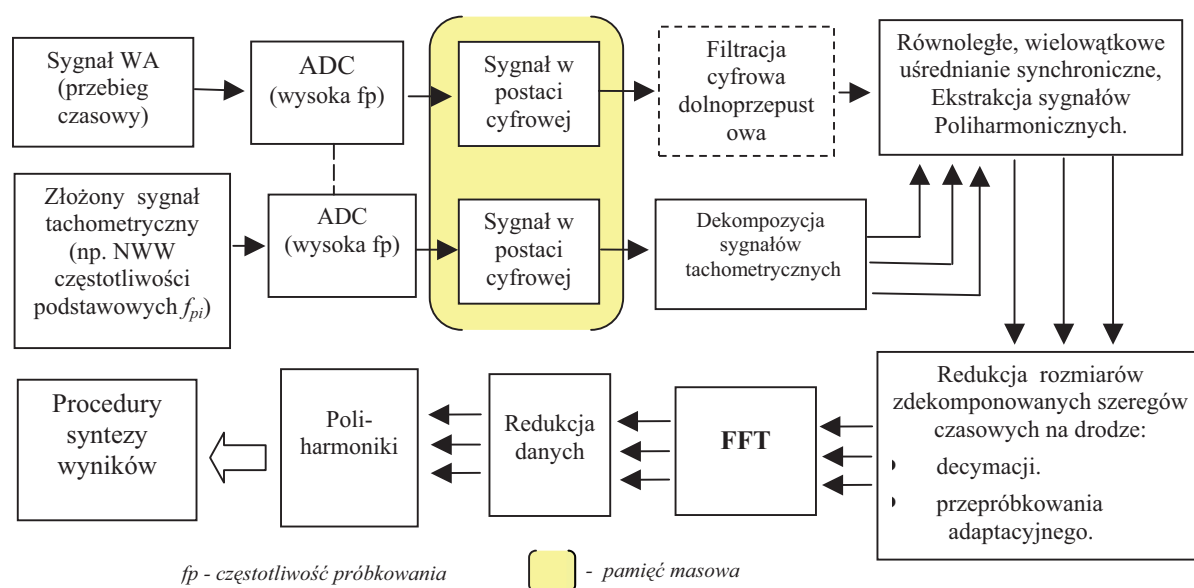
W niniejszej pracy zaproponowano nowe

podejście do zagadnienia dekompozycji stacjonarnych w sensie widmowym poliharmonicznych sygnałów poliokresowych poprzez stosowanie opracowanej techniki uśredniania multisynchronicznego MSA. Wykazano, że metoda MSA jest szczególnie przydatna dla analizy i diagnozowania podzespołów/elementów maszyn i procesów będących ze sobą w stałym związku kinematycznym.

2. UŚREDNIANIE MULTISYNCHRONICZNE

Technika uśredniania multisynchronicznego wykorzystuje mechanizmy klasycznego uśredniania synchronicznego. Nowum polega na wykorzystaniu złożonych sygnałów tachometrycznych oraz specyficznemu dla tej metody cyfrowemu przetwarzaniu sygnałów. Polega ono na wstępnym nadpróbkowaniu analizowanych sygnałów i złożonych sygnałów tachometrycznych, dolnoprzepustowej filtracji cyfrowej oraz decymacji stosowanej w celu redukcji rozmiarów szeregów czasowych. Technika ta pozwala na równoległe, wielowątkowe dekomponowanie sygnału poliokresowego na sygnały poliharmoniczne z jednoczesną redukcją szumu. Dodatkową zaletą metody jest możliwość ograniczenia liczby sygnałów tachometrycznych rejestrowanych w polu zjawiskowym.

Uproszczony schemat przetwarzania sygnałów wraz z postprocessingiem przedstawiono na rysunku 1. W tabeli 1 zestawiono porównanie cech metody poliharmonicznej filtracji rekurencyjnej z opracowaną metodą sumowania multisynchronicznego.



Rys. 1. Metoda *Uśredniania Multisynchronicznego MSA* – uproszczony schemat przetwarzania sygnałów i postprocessingu

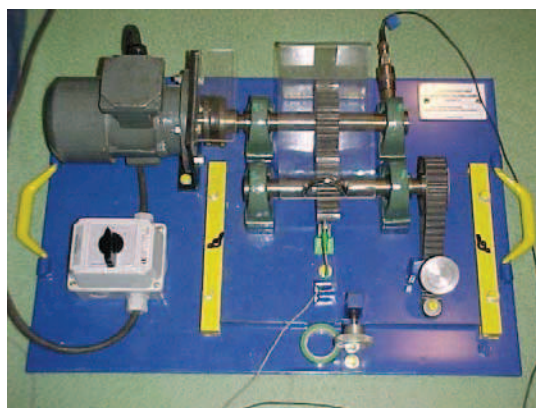
Tabela 1. Porównanie podstawowych cech *PFR* i *MSA* - metod dekompozycji sygnałów poliokresowych

Metoda przetwarzania sygnału	Poliharmoniczna filtracja rekurencyjna <i>PRF</i>	Uśrednianie Multisynchroniczne <i>MSA</i>
Cel stosowania metody	Dekompozycja widm sygnałów poliokresowych na poliharmoniki (związane z częstotliwościami podstawowymi charakterystycznymi dla danego podzespołu, elementu, procesu, zjawiska) i widmo resztkowe.	Dekompozycja sygnałów poliokresowych na składowe sygnały poliharmoniczne związane elementami i podzespołami maszyny, pozostającymi ze sobą w stałym związku kinematycznym. Redukcja szumu nieokresowego.
Postać danych (wejściowych)	Widmo amplitudowe sygnału WA.	Przebieg czasowy sygnału WA oraz złożony sygnał tachometryczny.
Parametry danych wejściowych	Wysoka rozdzielczość widma.	Nadpróbkowany zarówno sygnał WA jak i złożony sygnał tachometryczny.
Zasada funkcjonowania	Szeregowa ekstrakcja z widma poliharmonik, (dekomponowane w pierwszej kolejności posiadają priorytet przywłaszczania sobie wspólnych składowych).	Równoległa wielowątkowa dekompozycja sygnału (wspólne składowe są obecne w każdej w każdym dekomponowanym sygnale poliharmonicznym).
Stosowany pre/post processing	Preprocessing - analiza widmowa FFT, korekcja amplitudowo-częstotliwościowa widma wejściowego.	Postprocessing - redukcja rozmiarów zdekomponowanych szeregów czasowych <i>PHS</i> (np. na drodze decymacji).
Rodzaj sygnału synchronizującego	Detekcja lub autodetekcja częstotliwości podstawowych poliharmonik, metody śledzące [2].	Sygnały uzyskane na drodze dekompozycji złożonego sygnału tachometrycznego lub tworzone na podstawie technik adaptacyjnych (autosynchronizacja).
Wpływ obecności szumu w sygnale	Niska skuteczność dekompozycji sygnałów mocno zaszumionych. Część energii szumu zawiera się w składowych poliharmonik.	Metoda niewrażliwa na obecność szumu. Stopień redukcji szumu w zdekomponowanych sygnałach jest zależny od liczby realizacji poddanych uśrednieniu.

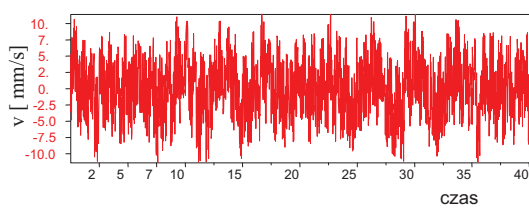
3. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA *MSA*

Zamieszczony przykład ilustruje funkcjonowanie metody *MSA* zastosowanej do dekompozycji sygnału prędkości drgań zarejestrowanego na modelu jednostopniowej przekładni zębatej przedstawionej na rysunku 2. Przekładnia napędzana była silnikiem asynchronicznym o mocy 0,18 kW o prędkość obrotową 1398 obr/min; liczba zębów kół zębatych $z_1=30$, $z_2=23$. Przetwornik drgań zlokalizowano na jednym z węzłów łożyskowych. Złożony sygnał tachometryczny (w tym przypadku sygnał zazębienia) odbierano przetwornikiem reluktancyjnym.

Cyfrowe przetwarzanie sygnałów realizowano przy pomocy opracowanych procedur w wirtualnym środowisku *DASYLab*. Na rysunku 3 przedstawiono fragment analizowanego sygnału prędkości drgań. Rysunek 4 ilustruje postać złożonego sygnału tachometrycznego oraz uzyskane w wyniku jego decymacji sygnały synchronizujące proces dekompozycji.

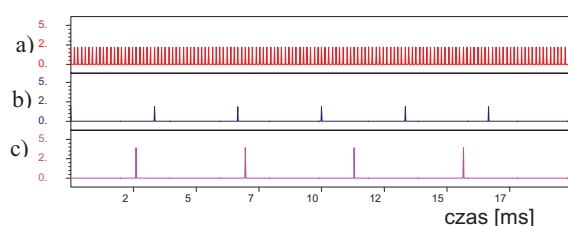


Rys.2. Badany model przekładni zębatej [11]



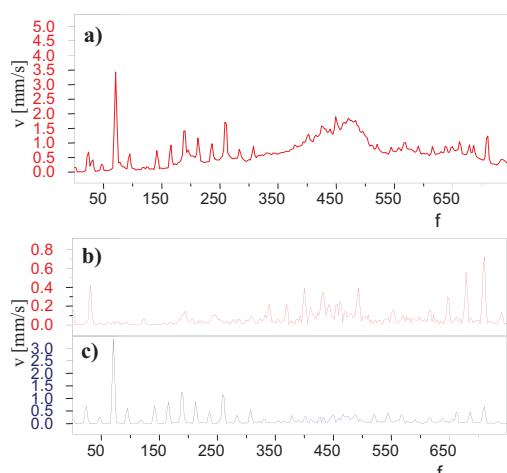
Rys.3. Postać sygnału prędkości drgań

przekładni (wejściowego do procedury MSA)



Rys. 4. Postać złożonego sygnału tachometrycznego (a), oraz sygnały synchronizujące proces dekompozycji sygnału WA dla wałka szybkoobrotowego (b) i wolnoobrotowego (c)

Na rysunku 5 przedstawiono wynik (w dziedzinie częstotliwości) funkcjonowania metody MSA. Porównano postać widma amplitudowego poli-okresowego i poliharmonicznego sygnału wejściowego z widmami dekomponowanych sygnałów (w trakcie funkcjonowania procedury, po uśrednieniu zaledwie kilkunastu realizacji).



Rys 5. Wynik funkcjonowania procedury MSA; (a) widmo sygnału wejściowego prędkości drgań przekładni zębatej; (b,c) widma zdekomponowanych sygnałów PHS związanych z wałkiem szybko- i wolnoobrotowym

Widma dekomponowanych sygnałów związanych z wałkiem wolno- i szybkoobrotowym przyjmują w wyniku realizacji kolejnych cykli MSA postać charakterystyczną dla mono-okresowych sygnałów poliharmonicznych (patrz rysunek 5 b,c). Widoczna jest również redukcja szumów. W paśmie ok. 450 Hz następuje sukcesywne uwydatnianie maskowanych szumem składowych okresowych sygnału.

5. PODSUMOWANIE

Dalsza parametryzacja widm uzyskanych w wyniku dekompozycji metodą uśredniania multisynchronicznego, podobnie jak metoda PRF, daje szerokie możliwości zastosowań diagnostycznych [3,4,9]. MSA może być z powodzeniem stosowana np. w badaniach identyfikacyjnych maszyn, w analizie informatywności punktów pomiarowych na etapie instalacji przetworników polu zjawiskowym (optymalizacja ich lokalizacji i usuwanie redundancji sprzętowej) oraz jako procedura przetwarzania sygnałów w systemach diagnostycznych.

Uśrednianie multisynchroniczne pozwala na skuteczną separację składowych poliharmonicznych występujących w sygnale WA, związanych z oddziaływaniami dynamicznymi poszczególnych podzespołów/elementów maszyn oraz procesów, o ile są one ze sobą powiązane związkami kinematycznymi.

Dalsze prace nad rozwojem metody będą zmierzały do opracowania procedur pozyskiwania sygnałów synchronizujących dekompozycję na podstawie zaawansowanego przetwarzania wejściowego sygnału WA, oraz określenia klas obiektów, co do których metoda ta może znaleźć zastosowanie.

LITERATURA

- [1] Adamczyk J., Krzyworzeka P., Łopacz H., *Systemy synchronicznego przetwarzania sygnałów diagnostycznych*, Wydawnictwo Naukowe DWN, Kraków 1999.
- [2] Barczewski R., *A Method of automatic detection of spectrum fundamental frequency*, XII Symposium Vibrations In Physical Systems, Poznań -Błażejewko 1988.
- [3] Barczewski R., *Poliharmoniczna filtracja rekurencyjna sygnałów drganiowych i jej zastosowania w diagnostyce maszyn*, Praca doktorska, WBM - Politechnika Poznańska, Poznań 1991.
- [4] Barczewski R., *Poliharmoniczna filtracja rekurencyjna - diagnostycznie zorientowana metoda analizy sygnałów*, Materiały X Szkoły Diagnostyki, Poznań - Zajęczkowo 1992.
- [5] Cempel C., *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*, WNT Warszawa 1989.
- [6] Cempel C., *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*, WNT Warszawa 1982.
- [7] Gade S., Herlufsen H., Konstantin-Hansen H., Wismer N.J., *Order tracking analysis*, Technical Review, No.2-1995 Brüel&Kjaer.
- [8] Gade S., Herlufsen H., Konstantin Hansen H., Wold H., *Characteristics of the Vold-Kalman*

- Order Tracking Filter*, Technical Review No. 1-1999, Brüel&Kjaer.
- [9] Toyoto T., Maekawa K. *Development and application of machine diagnostics*, Nippon Steel Technical Report, No. 19, June 1998.
- [10] Randal R.B, *Cepstrum analysis*, Technical Review, No. 3-1981 Brüel&Kjaer.
- [11] Strużyński A., *Jednostopniowa modelowa przekładnia zębata – stanowisko laboratoryjne*, Praca dyplomowa, PWSZ-Leszno, 2004.



Dr inż. Roman BARCZEWSKI jest adiunktem oraz kierownikiem Laboratorium Diagnostyki Systemów w Instytucie Mechaniki Stosowanej Politechniki Poznańskiej. Specjalizacja: diagnostyka i wibroakustyka maszyn i środowiska, techniki i metody cyfrowego przetwarzania sygnałów, badania drgań i hałasu, samouczące i samoorganizujące systemy diagnostyczne. Członek Zespołu Ergonomii - PAN/O Poznań, Członek Zarządu Głównego Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej.