

## ZASTOSOWANIE UŚREDNIANIA MULTISYNCHRONICZNEGO - MSA W DIAGNOSTYCE SILNIKÓW ASYNCHRONICZNYCH

Roman BARCZEWSKI

Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej  
ul. Piotrowo3, 60-965 Poznań, fax. (061) 6652307, e-mail: Roman.Barczewski@put.poznan.pl

### Streszczenie

W artykule zarysowano możliwości zastosowań uśredniania multisynchronicznego – MSA (diagnostycznie zorientowanej metody przetwarzania sygnału) do diagnozowania asynchronicznych silników elektrycznych. Technika ta może być stosowana na etapie badań identyfikacyjnych oraz jako standardowa procedura w zaawansowanych systemach diagnostycznych. Wyniki wstępnego przetwarzania sygnałów WA techniką MSA pozwalają określić punkty reprezentatywne dla obserwacji drgań, niosące informacje o zjawiskach i procesach zachodzących w silniku. Stosując MSA możliwe jest także prowadzenie selektywnej obserwacji zjawisk i procesów. W pracy zarysowano ideę metody oraz przykład zastosowania do dekompozycji sygnału drganiowego generowanego przez asynchroniczny silnik elektryczny.

Słowa kluczowe: diagnostyka silników elektrycznych, dekompozycja sygnału drganiowego, MSA

### APPLICATION OF MULTISYNCHRONOUS AVERAGING - MSA IN ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR DIAGNOSTICS

#### Summary

The paper outlines application of multisynchronous averaging MSA (of a diagnostically oriented signal processing method) in diagnosing asynchronous electric motors. The technique may be used at the stage of identification research and as a standard procedure in advanced diagnostic systems. The results of the MSA technique enable selecting the representative vibration observation points providing the information on the phenomena and processes undergoing in the motor. Moreover, a selective observation phenomena and processes becomes feasible. The paper provides an outline of idea of the method and an its example application for decomposition of a vibration signal generated by an asynchronous electric motor.

Keywords: electric motor diagnostics, vibration signal decomposition, MSA – techniques

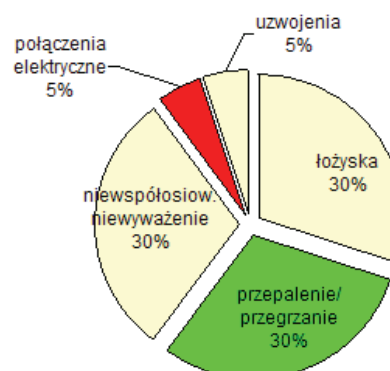
## 1. WPROWADZENIE

W diagnostyce silników elektrycznych (SE) stosowane są różne techniki i metody badań. Wykonywane są m.in. specjalizowane pomiary elektryczne [12], pomiary i analizy pola magnetycznego [11], pomiary temperatury uzwojeń i węzłów łożyskowych oraz pomiary i analizy drgań.

Diagnozowanie silników elektrycznych prowadzi się głównie w końcowej fazie produkcji (diagnostyka kontrolna) i eksploatacji (diagnostyka eksploatacyjna). W diagnostyce kontrolnej SE, szczególnie przydatne są metody dające możliwość szybkiej i nieinwazyjnej detekcji ewentualnych defektów, wad produkcyjnych i montażowych oraz stwierdzenia nieprawidłowości w funkcjonowaniu urządzenia. W diagnostyce eksploatacyjnej wykorzystywane są metody oparte głównie na pomiarach i analizie sygnałów wibroakustycznych oraz analizie widmowej prądu zasilającego SE.

Analizując rys. 1 można wnioskować, że oprócz zjawisk termicznych i wadliwego połączenia

zasilania, pozostałe 65% uszkodzeń silników teoretycznie powinno dać się zidentyfikować na podstawie pomiarów i analiz drgań obudowy lub węzłów łożyskowych.



Rys. 1. Uszkodzenia i defekty silników elektrycznych (na podstawie [15])

Dla ogólnej oceny stanu technicznego mogą być stosowane szerokopasmowe pomiary drgań. Ocena

stanu technicznego polega zazwyczaj na porównaniu wartości skutecznych prędkości drgań (np. w paśmie 10-1000 Hz) rejestrowanych na węzłach łożyskowych silnika (zawieszono elastycznie) z wartościami kryterialnymi określonymi w normach lub zaleceniach. Wartości dopuszczalne drgań mogą być przyjmowane w zależności od: klasy drganiowej silnika (*N-normalny*, *R-obniżony*, *S-specjalny*), prędkości obrotowej, wysokości wzniosu osi wirnika itp.

Wykorzystując sygnał drganiowy jako źródło informacji o stanie technicznym SE, zarówno w przypadku diagnostyki kontrolnej jak i eksploatacyjnej stajemy przed dylematem, w jakim miejscu na obiekcie badań zamontować przetwornik (lub przetworniki) drgań.

Jednym z możliwych rozwiązań jest lokalizacja przetworników w punktach optymalnych dla obserwacji jednego wybranego zjawiska (procesu, defektu), w którym inne zjawiska będą miały niewielki udział energetyczny. Takie podejście, w przypadku kompleksowej oceny stanu SE, wymaga zastosowania macierzy przetworników i wielowłokowego przetwarzania sygnałów. Lokalizacja przetworników powinna być poprzedzona badaniami identyfikacyjnymi w szczególności analizą *informatywności lokalnej*  $I_l$  [2,5] poszczególnych punktów pomiarowych.

Drugie podejście to umiejscowienie przetwornika w reprezentatywnym punkcie pomiarowym, w którym informatywność globalna  $I_g$  jest wysoka (niski poziom szumów i zakłóceń) i jednocześnie udział energetyczny poszczególnych zjawisk mających swoją reprezentację w sygnale drganiowym jest w miarę równomierny. Takie podejście jest uzasadnione przypadku optymalizacji strukturalnej systemów monitorująco-diagnostycznych *on-line* (pozwala to na usuwanie redundancji np. liczby instalowanych przetworników).

W obydwu podejściach niezbędne jest zastosowanie skutecznej i niezawodnie działającej

techniki dekompozycji sygnału drganiowego umożliwiającej separację składowych związanych z poszczególnymi zjawiskami. W pierwszym przypadku będzie to narzędzie badań identyfikacyjnych, w drugim procedura narzędziowa systemu diagnostycznego.

Zastosowanie diagnostycznie zorientowanej techniki dekompozycji sygnału i parametryzacja wyników dekompozycji do oceny stanu technicznego silników asynchronicznych jest uzasadniona, z uwagi na fakt koegzystencji w sygnałach drganiowych rejestrowanych na SE składowych związanych zarówno ze zjawiskami i uszkodzeniami natury mechanicznej jak i elektrycznej. Zjawiska te generują drgania o charakterze poliharmonicznym, a częstotliwości podstawowe  $f_p$  poliharmonik powiązane są odpowiednio z częstotliwością obrotową wirnika  $f_o$  oraz częstotliwością sieci zasilającej  $f_s$  (tabela 1). Z uwagi na zjawisko poślizgu ( $s$ ), charakterystyczne dla silników asynchronicznych, częstotliwości  $f_o$  i  $f_s$  oraz  $f_e$  (opisana zależnością 1, charakterystyczna dla mimośrodowości [15]) nie są wzajemnie swoimi nad- i pod wielokrotnościami.

$$f_e = \left[ (n_h \cdot n_r \pm n_e) \frac{1-s}{p} \pm n_i \right] f_s \quad (1)$$

gdzie:  $f_s$  - częstotliwość sieci zasilającej,

$n_h = 1, 2 \dots$  (kolejne harmoniczne),

$n_r$  - liczba żłobków wirnika,

$n_e$  - liczba całkowita;  $n_e=0$  dla nieosiowości typu statycznego (przesunięcie osi wirnika);

$n_e = 1, 2, \dots$  dla nieosiowości typu dynamicznego (ukosowanie osi wirnika),

$p$  - liczba par biegunów;  $n_i = 1, 3, 5, 7 \dots$   $s$  - poślizg.

Zważywszy na powyższe, potencjalnie możliwe jest dokonywanie separacji poliharmonik o częstotliwościach podstawowych  $f_o, f_s, f_e$ .

Tablica 1.

Uszkodzenia silnika elektrycznego wykrywane na podstawie analizy sygnału drganiowego; częstotliwości charakterystyczne defektów (na podstawie [15])

Rodzaj defektu	Częstotliwość charakterystyczna	Uwagi
Niewyważenie wirnika	$f_o$	w kierunku promieniowym
Luzy mechaniczne	$2 \cdot f_o, 3 \cdot f_o$	
Zgięcie wału wirnika	$f_o$	Kierunek promieniowy i osiowy
Defekty łożysk tocznych	sygnał o charakterze okresowym (impulsowym) na tle szumu wysokoczęstotliwościowego	częstotliwości powtarzania impulsów charakterystyczne dla defektów poszczególnych elementów łożyska [14]
Problemy natury elektrycznej	$n_h \cdot f_o, n_h \cdot f_s$	składowe powinny zaniknąć po wyłączeniu zasilania
Niewspółosiowość w silnikach indukcyjnych	$f_e \cdot f_o$	mogą występować boczne wstęgi modulacyjne $\pm s$
Pęknięte pręty w silnikach indukcyjnych	$f_o \pm 2 \cdot s \cdot f_s$	trudne do wykrycia z uwagi na niskie wartości amplitud
Uszkodzenie uzwojenia stojana	$f_s, 2 \cdot f_s, 4 \cdot f_s$	trudne do odróżnienia od innych defektów (w przypadku stosowania jedynie analizy drgań)

## 2. MSA JAKO NARZĘDZIE DEKOMPOZYCJI POLIHARMONICZNEJ

Do dekompozycji sygnału zaproponowano technikę uśredniania multisynchronicznego (*Multisynchronous Averaging - MSA*) [4]. Dalsze przetwarzanie zdekomponowanych sygnałów lub poliharmonik pozwala na jakościową i ilościową ocenę zjawisk, przydatną w analizie informatywności punktów pomiarowych, wyborze optymalnego punktu i kierunku obserwacji diagnostycznej (np. dla wyeksponowania pewnych zjawisk). Technika ta może być stosowana jako procedura narzędziowa w systemach zaawansowanego przetwarzania sygnałów.

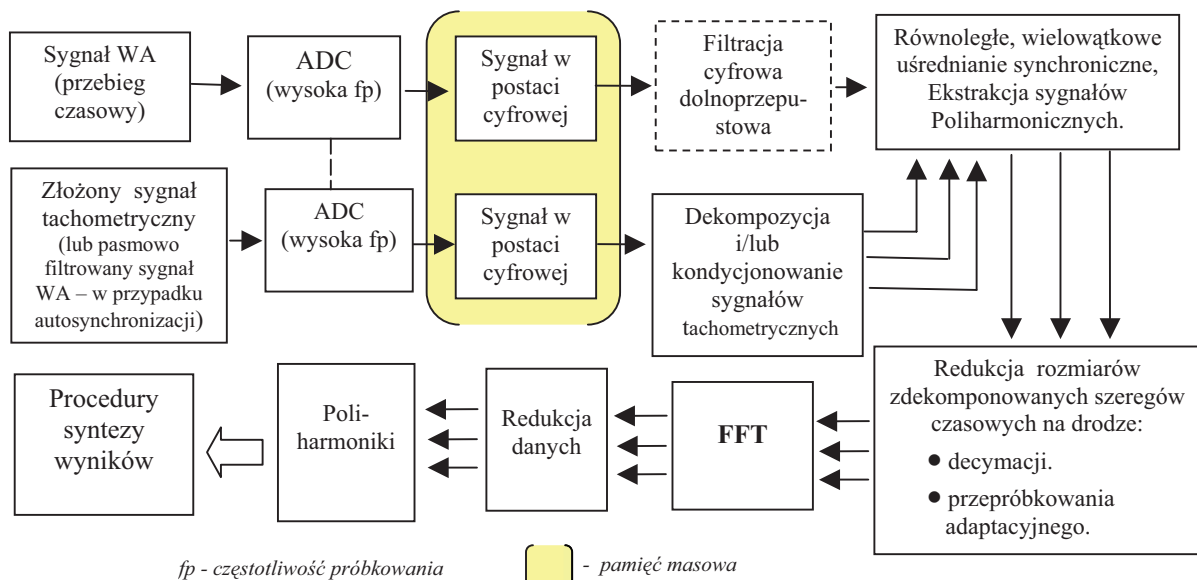
Technika uśredniania multisynchronicznego wykorzystuje mechanizmy klasycznego i/lub śledzącego uśredniania synchronicznego [1,7,13]. Zasadnicza różnica polega na wykorzystaniu złożonych sygnałów tachometrycznych oraz specyficznemu dla tej metody cyfrowemu przetwarzaniu sygnałów. Specyfika przetwarzania cyfrowego w *MSA* polega na wstępnym nadpróbkowaniu analizowanych sygnałów i złożonych sygnałów tachometrycznych, dolnoprzepustowej filtracji cyfrowej, oraz decymacji [1], stosowanej w celu redukcji rozmiarów szeregów czasowych. Technika ta pozwala na równoległe, wielowątkowe dekomponowanie sygnału poliookresowego na monookresowe sygnały poliharmoniczne [5,6]. Metoda *MSA* umożliwia jednoczesną redukcję szumu, a stopień redukcji szumu w zdekomponowanych sygnałach jest zależny od liczby realizacji poddanych uśrednieniu.

W trakcie funkcjonowania procedury (realizowanej w czasie rzeczywistym) możliwe jest obserwowanie przebiegów czasowych równoległe zdekomponowanych sygnałów, wyznaczanie na ich podstawie miar liczbowych (estymat) oraz wielowariantowe dalsze przetwarzanie np. wykonywanie analiz widmowych i syntetyzowanie wyników.

Dodatkową zaletą metody jest możliwość ograniczenia liczby sygnałów tachometrycznych rejestrowanych w polu zjawiskowym, a w przypadku stosowania autosynchronizacji sygnały tachometryczne są częściowo lub całkowicie zbędne.

Dla prawidłowego funkcjonowania procesu dekompozycji istotne jest pozyskanie sygnałów synchronizujących, odpowiadających częstotliwościom podstawowym poliharmonik. W przypadku silników asynchronicznych można je uzyskać na wiele sposobów np. na drodze:

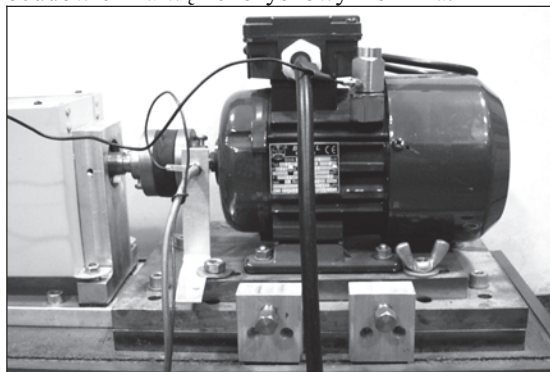
- wykorzystania dominujących i/lub niskoenergetycznych składowych sygnału prądu zasilania silnika [16,17],
- filtracji cyfrowej i/lub kondycjonowania złożonych sygnałów tachometrycznych rejestrowanych w polu zjawiskowym oraz sygnału referencyjnego dla częstotliwości sieciowej  $f_s$ ,
- autosynchronizacji – poprzez wielowątkowe przetwarzanie zdekomponowanego sygnału drganiowego polegające na równoległej cyfrowej filtracji pasmowej, tworzeniu złożonego sygnału tachometrycznego oraz jego decymacji.



Rys. 2. Metoda Uśredniania Multisynchronicznego *MSA* – uproszczony schemat przetwarzania sygnałów i postprocessingu [4,6]

### 3. PRZYKŁAD DEKOMPOZYCJI

Metodę sumowania multisynchronicznego zastosowano do dekompozycji sygnału przyspieszeń drgań jednofazowego silnika asynchronicznego małej mocy, przedstawionego na rys. 3. Podczas prowadzenia eksperymentu przetwornik przyspieszeń drgań mocowano na obudowie i na węźle łożyskowym silnika.



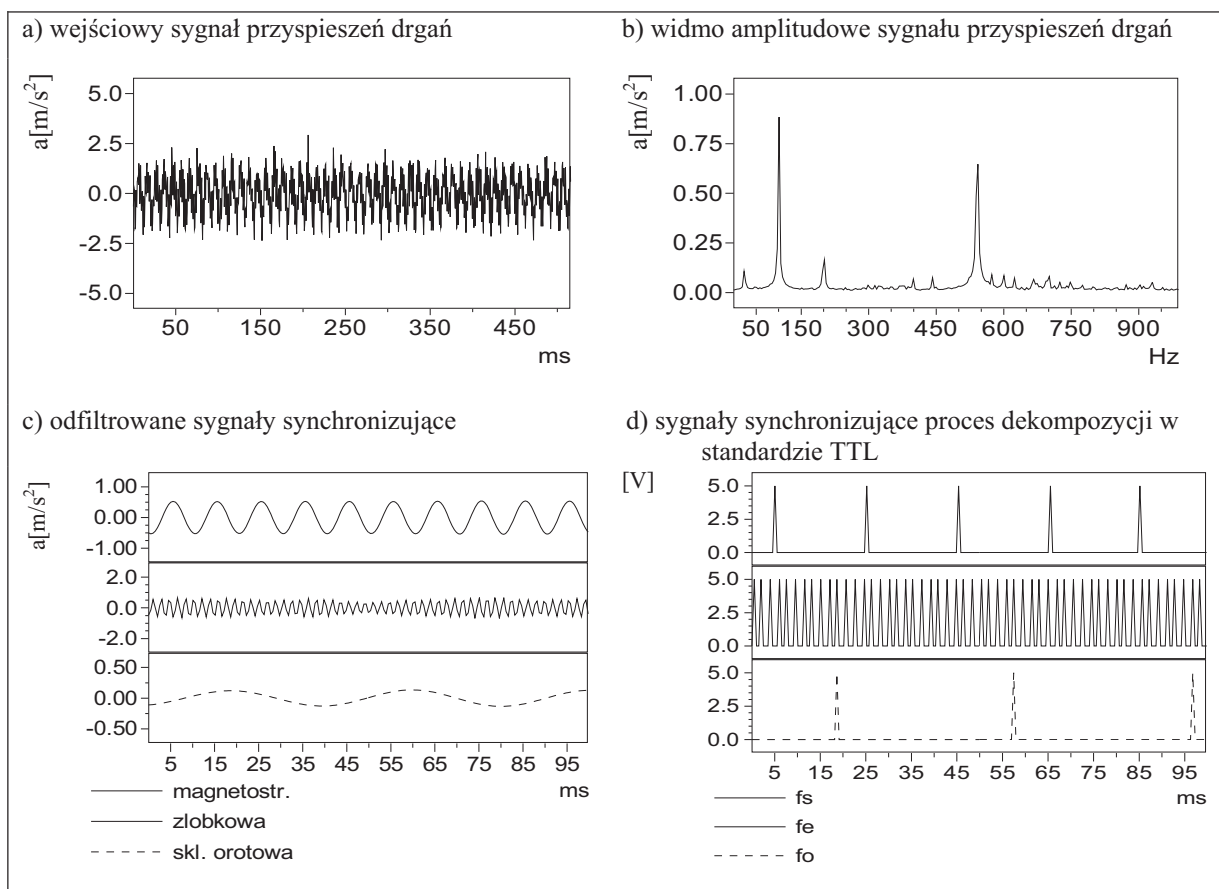
Rys.3. Obiekt badań - jednofazowy asynchroniczny silnik indukcyjny [6]

Dodatkowo zainstalowana sonda tachometryczna i przekładnik napięciowy w układzie zasilania były wykorzystywane jedynie na etapie weryfikacji poprawności tworzenia

sygnałów synchronizujących proces dekompozycji. Przyspieszenia drgań silnika rejestrowano przy pomocy piezoelektrycznego przetwornika drgań. Sygnał poddano wstępnemu wzmocnieniu i filtracji antyaliasingowej (filtr dolnoprzepustowy - pasmo do 1 kHz), a następnie przetwarzano do postaci cyfrowej 12 bitowym przetwornikiem ADC. Sterowanie procesem akwizycji oraz dalsze przetwarzanie cyfrowe realizowano w systemie DasyLab.

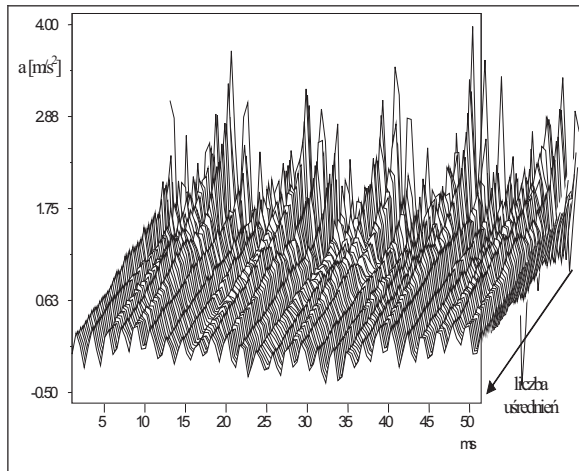
Na rysunku 4 przedstawiono postacie sygnałów przyspieszeń drgań uzyskane na drodze filtracji sygnału wejściowego w w/w pasmach oraz otrzymane na ich podstawie sygnały synchronizujące proces dekompozycji metodą MSA. Specyfika sygnału przyspieszeń drgań generowanych przez silnik asynchroniczny pozwoliła na zastosowanie techniki autosynchronizacji procesu dekompozycji. Sygnały synchronizujące (rys. 4d) uzyskano na drodze wąskopasmowej filtracji cyfrowej (filtry 10 rzędu) pierwotnego sygnału przyspieszeń (rys.4a) w pasmach:

- częstotliwości obrotowej  $f_o$  (ok. 24.5 Hz),
- występowania zjawiska magnetostrykcji  $2f_s$  (100 Hz),
- występowania częstotliwości żłobkowej  $f_e$ .



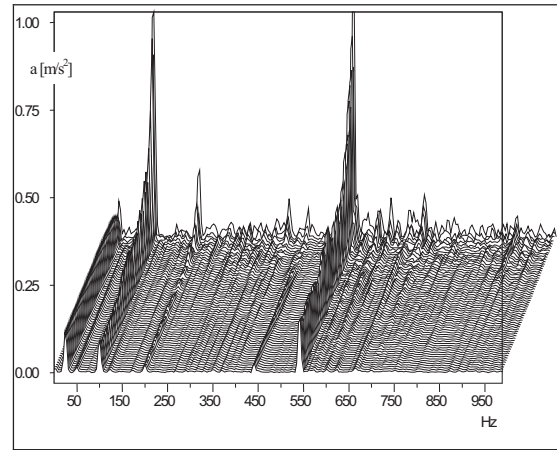
Rys. 4. Tworzenie sygnałów synchronizujących proces dekompozycji metodą MSA na podstawie sygnału przyspieszeń drgań zarejestrowanego na obudowie asynchronicznego silnika indukcyjnego; (sygnały synchronizujące dekompozycję dla:  $f_s$  - częstotliwość sieci zasilającej;  $f_o$  - częstotliwość obrotowej wirnika,  $f_e$  - częstotliwości żłobkowej)

Odfiltrowane sygnały (rys. 4c) zostały w kolejnym kroku zamienione na standard TTL oraz dodatkowo w przypadku składowej 100 Hz poddane decymacji (rys. 4d).



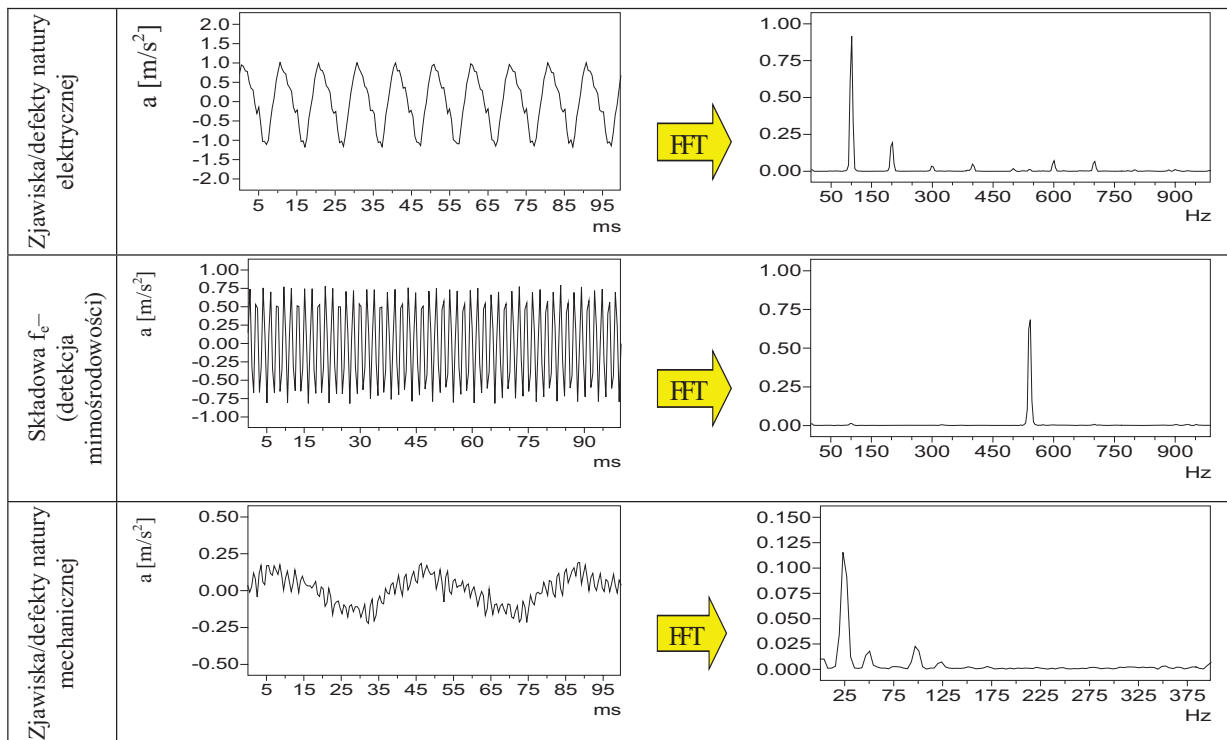
Rys. 5. Proces uśredniania synchronicznego dla jednego z kanałów MSA

Rysunki 5 i 6 ilustrują proces uśredniania synchronicznego dla jednego z kanałów dekompozycji (w tym przypadku zjawisk natury mechanicznej). W trakcie uśredniania (kolejnych jego realizacji) następuje uwydatnianie składowych synchronicznych z częstotliwością obrotową wirnika  $f_0$  oraz widoczna jest redukcja szumu i składowych sygnału o częstotliwościach różnych od  $n \cdot f_0$  ( $n=1,2,3 \dots$ ).



Rys. 6. Proces uśredniania synchronicznego (obserwacja w dziedzinie częstotliwości; analiza wykonywana współbieżnie z procesem sumowania synchronicznego)

Na rys. 7 przedstawiono efekt równoległej, wielowątkowej dekompozycji MSA po wykonaniu kilkudziesięciu iteracji uśredniania. Dekomponowane sygnały w trakcie realizacji procedury MSA przybierają postać monookresowych sygnałów poliharmonicznych. Efekt procesu uśredniania można również obserwować w dziedzinie częstotliwości. W wynikach wykonywanych współbieżnie analiz widmowych sygnałów uśrednianych synchronicznie wyraźnie widać zanik składowych niesynchronicznych z  $f_p$  (porównaj rys. 4b).

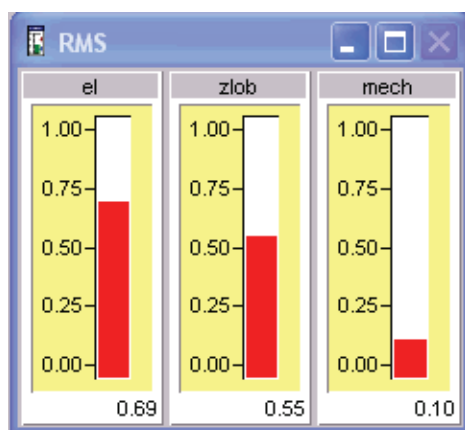


Rys. 7. Składowe sygnały przyspieszeń drgań asynchronicznego silnika elektrycznego (patrz rys 4a) i ich widma amplitudowe, uzyskane w wyniku dekompozycji metodą uśredniania multisynchronicznego (MSA)

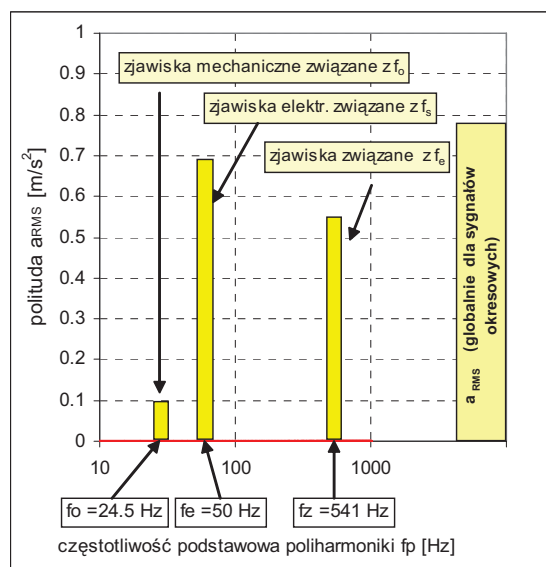
#### 4. OBSZAR ZASTOSOWAŃ MSA

Uśrednianie multisynchroniczne MSA podobnie jak metoda PRF (Poliharmonicznej Filtracji Rrekurencyjnej) [3], daje wiele możliwości zastosowań diagnostycznych. Zastosowania te zależą głównie od sposobu dalszego przetwarzania uzyskanych w wyniku dekompozycji sygnałów i widm.

Z punktu widzenia zastosowań metody w diagnostyce silników asynchronicznych można zaproponować w pierwszym podejściu parametryzację zdekomponowanych sygnałów np. wyznaczenie miar amplitudowych. Na tej podstawie możliwe jest wartościowanie i ocena poszczególnych kategorii zjawisk występujących w silniku (patrz rysunek 8), lub tworzenie widma okresowości (rys.9) [3,8,9].



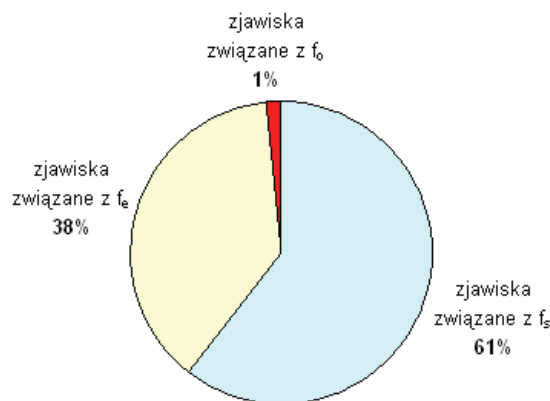
Rys. 8. Wartości skuteczne przyspieszeń drgań w [m/s<sup>2</sup>], związane z poszczególnymi zjawiskami mającymi swoją reprezentację w sygnale zarejestrowanym w jednym z punktów pomiarowych na korpusie silnika



Rys. 9. Przykładowa postać widma okresowości sygnału przyspieszeń zarejestrowanego na korpusie pracującego silnika elektrycznego

Śledzenie zmian widma okresowości (WO) lub składu poliharmonik w czasie eksploatacji  $\Theta$  pozwala obserwować i prognozować rozwój uszkodzeń poszczególnych podzespołów. Na podstawie poliharmonik można również tworzyć dyskryminanty, które opisano szerzej w [2,5]. Pozwalają one na identyfikację poszczególnych rodzajów defektów i uszkodzeń.

Inne możliwości zastosowań wyników dekompozycji MSA niesie za sobą analiza informatywności. Dysponując widmami mocy zdekomponowanych sygnałów oraz zakładając, że składowe okresowe są użyteczną diagnostycznie częścią sygnału (niosącą informację o zjawiskach okresowych), można wyznaczyć: informatywność globalną, lokalną i cząstkową [3,4]. Wyznaczanie poszczególnych informatywności oparte jest na analizie udziałów: globalnej mocy sygnałów okresowych, mocy poliharmonik lub ich poszczególnych składowych w mocy całkowitej analizowanego sygnału.



Rys. 10. Przykładowy udział energetyczny poszczególnych zjawisk związanych z częstotliwościami podstawowymi  $f_o, f_e, f_s$

**Informatywność globalna** wyraża stosunek mocy wszystkich składowych okresowych (łącznie) w badanym procesie (sygnale) do mocy całkowitej procesu (sygnалу).

$$I_g = \frac{P_u}{P_c} = \frac{P_o}{P_c} \quad (2)$$

gdzie:  $P_c$  – moc całkowita sygnału,  
 $P_u$  – moc sygnałów użytecznych,  
 $P_o$  – moc wszystkich składowych okresowych (zsumowana moc wszystkich poliharmonik),

oraz

$$P_o = \sum_i P_{o_i} \quad (3)$$

przy czym:  $P_{o_i}$  – moc  $i$  – tej poliharmoniki;

$i$  – numer kolejnej poliharmoniki,  
 $i = 1 \dots M$  ( $M$  – liczba poliharmonik).

**Informatywność lokalna** – wyraża stosunek mocy  $i$ -tej poliharmoniki do mocy całkowitej sygnału. Jest to zatem stosunek mocy poszczególnych składowych widma okresowości (związanych z częstotliwościami podstawowymi  $f_{p,i}$ ) do mocy całkowitej sygnału:

$$I_{l,i} = \frac{P_{u_i}}{P_c} = \frac{P_{o_i}}{P_c} \quad (4)$$

gdzie:

$$P_{o_i} = \sum_j P_{o_{i,j}} \quad \text{oraz}$$

$P_{o_{i,j}}$  - moc  $j$ -tej składowej  $i$ -tej poliharmoniki

**Informatywność cząstkowa** jest definiowana jako stosunek mocy  $j$ -tej składowej poliharmoniki do mocy poliharmoniki lub jako stosunek mocy  $j$ -tej składowej  $i$ -tej poliharmoniki do mocy całkowitej sygnału.

$$I_{c_{i,j}} = \frac{P_{o_{i,j}}}{P_{o_i}} \quad \text{lub} \quad I_{c_{i,j}} = \frac{P_{o_{i,j}}}{P_c} \quad (5)$$

Na podstawie porównania informatywności globalnej dla kilku punktów pomiarowych można dokonać wyboru punktu najbardziej informatywnego dla obserwacji diagnostycznej. Analiza informatywności lokalnej jest skutecznym narzędziem ułatwiającym dokonanie wyboru punktu reprezentatywnego np. dla obserwacji wszystkich zachodzących zjawisk, lub na odwrót dokonanie wyboru punktu, w którym jedno ze zjawisk o charakterze okresowym będzie w sygnale drganiowym eksponowane, a udział energetyczny pozostałych zjawisk nie będzie znaczący.

Informatywność cząstkowa może być pomocna przy podejmowaniu decyzji dotyczących wyboru wielkości pomiarowej (np. prędkości, przyspieszeń drgań), w tych przypadkach, gdy istotna będzie w miarę równomierna reprezentacja poszczególnych składowych nadharmonicznych. Optymalną wielkością będzie ta, dla której odchylenie standardowe informatywności cząstkowych składowych poliharmoniki będzie miało mniejszą wartość.

Tablica 2.

Obszary zastosowań wyników dekompozycji poliharmonicznej metodą MSA

Forma wyniku	Zastosowania diagnostyczne
Zdekomponowane monookresowe sygnały czasowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parametryzacja sygnałów i wyznaczanie miar amplitudowych; na ich podstawie ocena wibroaktywności zjawisk i/lub podzespołów.</li> <li>• Dalsze przetwarzanie sygnałów w dziedzinie czasu, amplitudy i częstotliwości i stosowanie zaawansowanych technik diagnozowania i prognozowania.</li> </ul>
Poliharmoniki uzyskane z widm dekomponowanych sygnałów (ciągi składowych związane z daną częstotliwością podstawową)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Określenie typu uszkodzenia danego podzespołu lub elementu generującego poliharmonikę na podstawie: <ul style="list-style-type: none"> <li>– udziału amplitudowego poszczególnych składowych poliharmoniki,</li> <li>– dyskryminant.</li> </ul> </li> </ul>
Widmo okresowości WO (moc lub wartość skuteczna poliharmoniki w funkcji częstotliwości podstawowej)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocena zaawansowania wybranego procesu, zjawiska, uszkodzenia i/lub śledzenie jego zmian w czasie eksploatacji <math>\Theta</math>.</li> <li>• Lokalizacja uszkodzenia (przy znajomości częstotliwości podstawowych zjawisk)</li> </ul>
Globalny udział składowych okresowych (np. wartość skuteczna wszystkich składowych okresowych)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ogólna ocena stanu silnika, globalna ocena zaawansowania uszkodzeń.</li> </ul>
Analiza informatywności (wielowariantowa analiza udziału mocy składowych okresowych w analizowanym sygnale drganiowym)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Informatywność globalna</b> - wstępny wybór punktów informatywnych dla obserwacji diagnostycznej.</li> <li>• <b>Informatywność lokalna</b> - ocena przydatności danego punktu pomiarowego dla obserwacji poszczególnych zjawisk generującego poliharmoniki (separacja zjawisk) lub wybór punktu reprezentatywnego (usuwanie redundancji strukturalnej w systemach monitorująco-diagnostycznych).</li> <li>• <b>Informatywność cząstkowa</b> – wybór wielkości pomiarowej dla prowadzenia obserwacji diagnostycznej.</li> </ul>

#### 4. PODSUMOWANIE

- Dla realizacji technicznej zaproponowanej metody niezbędne jest stosowanie układów pozwalających na wielowątkowe cyfrowe przetwarzania sygnałów.
- Obserwacja zmian widma okresowości uzyskanego na drodze MSA może być cennym narzędziem w układach okresowego lub ciągłego monitorowania stanu technicznego silników na etapie ich eksploatacji.
- Zarówno dla potrzeb diagnostyki eksploatacyjnej jak i kontrolnej, dla konkretnego modelu silnika niezbędne jest określenie wartości kryterialnych dla poszczególnych klas zjawisk mających swoją reprezentację w sygnale drganiowym.

#### LITERATURA

- [1] Adamczyk J., Krzyworzeka P., Łopacz H., *Systemy synchronicznego przetwarzania sygnałów diagnostycznych*, Wydawnictwo Naukowe DWN, Kraków 1999.
- [2] Barczewski R., *Poliharmoniczna filtracja rekurencyjna - diagnostycznie zorientowana metoda analizy sygnałów*, Materiały X Szkoły Diagnostyki, Poznań - Zajęczkowo 1992.
- [3] Barczewski R., *Poliharmoniczna filtracja rekurencyjna sygnałów drganiowych i jej zastosowania w diagnostyce maszyn*, Praca doktorska, WBM - Politechnika Poznańska, Poznań 1991.
- [4] Barczewski R., Uśrednianie multisynchroniczne (MSA) - diagnostycznie zorientowana metoda analizy sygnałów wibroakustycznych, *Diagnostyka* Vol. 30, tom 1, 2004, str. 9-12.
- [5] Barczewski R., *Poliharmoniczna filtracja rekurencyjna – metoda analizy sygnałów poliharmonicznych i poliokresowych*, Inżynieria Diagnostyki Maszyn, Praca zbiorowa, redakcja Żółtowski B., Cempel C., PTDT-ITE PIB Radom, Warszawa - Bydgoszcz - Radom 2004, rozdział 15.
- [6] Barczewski R., *Zastosowanie sumowania multisynchronicznego do dekompozycji sygnału drganiowego asynchronicznego silnika elektrycznego*, XXXII Ogólnopolskie Seminarium Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2005. (pełen tekst na CD)
- [7] Cempel C., *Sumowanie synchroniczne jako metoda diagnostyki maszyn*, Archiwum Budowy Maszyn 197,6 zeszyt 3, str. 433-441.
- [8] Cempel C., *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*, Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań 1985.
- [9] Cempel C., Barczewski R., *Periodicity Spectrum as a New Designation Method of Vibroacoustical Signal Analysis*. 5<sup>th</sup> Seminar and Exhibition on Noise Control, Szeged – Hungary 1986.
- [10] Cempel C., *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*, WNT Warszawa 1982.
- [11] *Diagnostyka Maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań*, Praca zbiorowa, redakcja Cempel C., Tomaszewski F., MCNEMT Radom 1992.
- [12] Glinka T., *Diagnozowanie maszyn elektrycznych*, Inżynieria Diagnostyki Maszyn, Praca zbiorowa, redakcja Żółtowski B., Cempel C., PTDT- ITE PIB Radom, Warszawa - Bydgoszcz - Radom 2004, rozdział 6, część II, str. 633-654.
- [13] Majewski M., *Śledzące uśrednianie synchroniczne w analizie źródeł drgań silnika elektrycznego*, XII Sympozjum Drgania w Układach Fizycznych, Poznań Błażejewko 1986.
- [14] Radkowski S., *Diagnozowanie łożysk tocznych* Inżynieria Diagnostyki Maszyn, Praca zbiorowa, redakcja Żółtowski B., Cempel C., PTDT - ITE PIB Radom, Warszawa - Bydgoszcz - Radom 2004, rozdział ,1 część II, str. 529-544.
- [15] Rao B.K.N. (editor), *Handbook of condition monitoring*, 1st edition, Elsevier Advanced Technology , Oxford UK, 1996.
- [16] Swędrowski L., *Rozwój metodyki diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego poprzez pomiar i analizę widmową prądu zasilającego*, XXXVI Międzyuczelniana Konferencja Metrologów MKM'04. 2004.
- [17] Swędrowski L., *Metodyka diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego poprzez pomiar i analizę widmową prądu zasilającego*, *Diagnostyka* Vol. 30, tom 2, 2004, str. 113-117.



Dr inż.

Roman BARSZCZEWSKI jest adiunktem oraz kierownikiem Laboratorium Diagnostyki Systemów w Instytucie Mechaniki Stosowanej Politechniki Poznańskiej. Specjalizacja: diagnostyka i wibroakustyka maszyn i środowiska badania drgań i hałasu,

techniki i diagnostycznie zorientowane metody cyfrowego przetwarzania sygnałów WA; samouczące i samoorganizujące systemy diagnostyczne. Członek Zespołu Ergonomii - PAN/O Poznań, Członek Zarządu Głównego Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej. Członek KT PKN nr 158 ds. Bezpieczeństwa maszyn i ergonomii.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005-2007 jako projekt badawczy 4T07B03328