

## AMPLITUDOWO-FAZOWA APROKSYMACJA SYGNAŁÓW POMIAROWYCH

Jacek PIĄTKOWSKI

Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Politechniki Częstochowskiej  
Ul. Dąbrowskiego 73, 42-200 Częstochowa, fax (34) 325 05 89, e-mail: [jacekp@icis.pcz.pl](mailto:jacekp@icis.pcz.pl)

### Streszczenie

W wielu przypadkach obserwacji zjawisk, w tym zwłaszcza dynamicznych, dysponujemy danymi pozyskanymi ze zdecydowanie różną rozdzielczością - np. w dziedzinie czasu i przestrzeni. W procesie przetwarzania i analizy takich danych często wykorzystywane są różnego rodzaju metody interpolacji lub/i aproksymacji. W szczególności jednak sposób należy traktować zbiory cech, których wartości zmieniają się w sposób amplitudowo-fazowy. Brak właściwej interpretacji przesunięć fazowych przy przetwarzaniu sygnałów pomiarowych może prowadzić do istotnego zniekształcenia obrazu analizowanego procesu.

W niniejszym artykule zaprezentowano algorytm amplitudowo-fazowej aproksymacji sygnałów pomiarowych wykorzystywanej do tworzenia trójwymiarowych obrazów drgań względnych wału maszyny wirnikowej w nieustalonych warunkach jej pracy.

Słowa kluczowe: diagnostyka maszyn, drgania, identyfikacja postaci drgań wałów, aproksymacja danych.

### PHASE-AMPLITUDE APPROXIMATION OF MEASURING SIGNALS

#### Summary

In many cases of phenomena observation (especially dynamical phenomena) we have data acquired with different resolutions - for example in time and space domain. For processing and computing of these data a different solutions of interpolation and/or approximation are often used. Data having phase-amplitude nature should be treated in a special way of data processing. The lack of proper interpretation of phase translations in many cases can result in obtaining the significant distortions of analysed process pattern.

In this paper the algorithm of phase-amplitude approximation has been presented. This algorithm is used for creating the three dimensions patterns of rotating machine shaft vibrations, in transient state of machine work.

Keywords: machine diagnostic, vibrations, identification of shaft vibrations shape, data approximation.

### 1. WSTĘP

W procesie eksploatacyjnym maszyn, w tym zwłaszcza maszyn krytycznych, szczególnie ważną rolę odgrywa prawidłowa identyfikacja i ocena aktualnego stanu technicznego monitorowanych obiektów. Możliwość śledzenia i klasyfikowania bieżących wartości cech diagnostycznych będących wskaźnikami stanu technicznego pozwala na podejmowanie decyzji o sposobie eksploatacji danego urządzenia. Skuteczna i odpowiednio wczesna identyfikacja symptomów towarzyszących pojawiającym się nieprawidłowościom w działaniu maszyn pozwala też na zdecydowaną poprawę bezpieczeństwa i obniżenie kosztów ich eksploatacji jak również często pozwala zapobiegać groźnym w skutkach awariom. Do oceny stanu technicznego maszyn wykorzystywane mogą być cechy pomiarowe szeregu różnych procesów takich jak cieplne, elektryczne, tribologiczne, jednakże w przypadku większości konstrukcji zawierających

elementy wirujące jakościowo najlepszymi wskaźnikami stanu są parametry drganiowe [1].

Zastosowanie w diagnostyce maszyn pomiarów drgań względnych jak i bezwzględnych daje możliwość bezinwazyjnej oceny zarówno ogólnego stanu technicznego monitorowanych obiektów jak i poszczególnych ich podzespołów. Sygnały wibroakustyczne mają bowiem bezpośredni związek z charakterystycznymi dla tych maszyn częstościami obrotowymi wału, kół zębatych, wirników itp. Tak więc np. pomiar drgań bezwzględnych, poza ogólną oceną stanu technicznego maszyn, pozwala też identyfikować nieprawidłowości działania poszczególnych ich podzespołów spowodowane np. niewyważeniem wirników, uszkodzeniem łożysk, uszkodzeniem zębów przekładni zębatych czy też rozosowaniem sprzęgieł. Analiza różnych cech sygnałów drgań względnych (mierzonych np. jako przemieszczenie wału względem nieruchomej panwi łożyskowej) umożliwia m.in. identyfikację nieprawidłowości pracy łożysk hydrokinetycznych,

wygięcia, pęknięcia czy złego osiowania wałów, niewyważenia czy też przycierania wirników.

Sygnały drganiowe, będące nośnikiem informacji zarówno o warunkach pracy jak i stanie technicznym maszyn są przetwarzane w celu uzyskania określonych miar charakteryzujących dany sygnał. Najogólniej, sygnały te mogą być analizowane w dziedzinie czasu [2, 3], w dziedzinie częstotliwości [1, 4, 5], czy też w przestrzeni czasowo-częstotliwościowej [6, 7, 8].

Wybór liczby i rodzaju cech wykorzystywanych do identyfikacji stanu technicznego urządzenia zależy zwykle od jego konstrukcji i przeznaczenia, warunków technicznych i możliwości montażu przetworników oraz układów pomiarowych. W najprostszym przypadku oceniana może być jedna cecha np. wartość skuteczna prędkości, przyspieszenia czy też przemieszczenia drgań, poziom emisji akustycznej czy też ilość impulsów uderzeniowych [2]. W większości jednak zaawansowanych systemów czy układów diagnostycznych rejestrowane sygnały drganiowe są przetwarzane w celu wyznaczenia wielu miar stanowiących zbiór cech  $\mathbf{x}$

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathcal{X} \quad (1.1)$$

reprezentujących nadzorowane obiekty w przestrzeni zwanej przestrzenią cech ( $\mathcal{X}$ ) [9, 10].

Wykorzystywane cechy muszą być oczywiście tak dobierane, by na podstawie ich wartości (podzbiorów wartości cech) istniała możliwość jednoznacznego stwierdzenia przynależności stanu urządzenia do określonej klasy stanów technicznych.

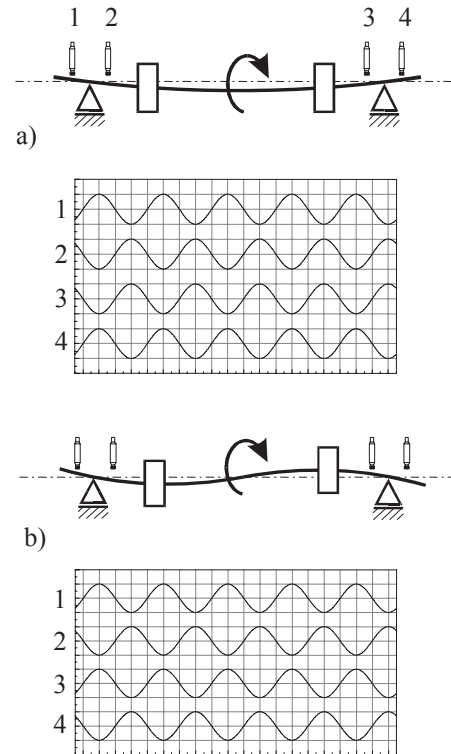
Bardzo często jednak ze względów ekonomicznych jak również i technicznych nie można pozyskać odpowiedniego zbioru cech. Zawsze istnieją bowiem ograniczenia co do miejsc i liczby montowanych przetworników. W takim przypadku można powiedzieć, że dysponuje się fragmentami obrazu badanego procesu, na podstawie których dokonywana będzie próba jego klasyfikacji. Czasami jednak postępowanie takie może prowadzić do otrzymania błędnych wyników.

W procesie przetwarzania sygnałów pomiarowych często wykorzystywane są różnego rodzaju metody interpolacji lub/i aproksymacji uzyskiwanych wyników w celu estymacji brakujących wartości, które nie mogą być wyznaczone bezpośrednio. W szczególności jednak sposób należy traktować zbiory cech, których wartości zmieniają się w sposób amplitudowo-fazowy. Przykładem zjawiska dostarczającego tego typu danych pomiarowych są drgania giętne wałów maszyn wirnikowych.

Jednoczesna ocena wartości amplitudy drgań względnych oraz fazy względnej tych drgań pozwala na identyfikowanie postaci drgań wału tzw. modów drgań.

Na rys. 1 przedstawione zostały przykładowe przebiegi czasowe sygnałów rejestrowanych (czterema przetwornikami przemieszczenia drgań) dla najczęściej występujących dwóch pierwszych

modów drgań wału. Przy założeniu doskonale sztywnych podpór łożyskowych w punktach podparcia wału występują węzły drgań.



Rys. 1. Przebiegi czasowe sygnałów drgań względnych charakterystyczne dla pierwszego (a) i drugiego (b) modu drgań

Jak widać przetworniki montowane po przeciwnych stronach podpory łożyskowej rejestrują sygnały przesunięte w fazie o  $180^\circ$ . Dla I modu drgań (rys. 1.a) obserwuje się zgodność fazową pomiędzy sygnałami rejestrowanymi w punktach 1 i 4 oraz 2 i 3. Odmienna sytuacja występuje dla II modu drgań (rys. 1.b), gdzie sygnały 1 i 4 oraz 2 i 3 są w przeciwfazie [11].

Oczywiście w modelowym przypadku przedstawionym na rys. 1 nie występuje jakakolwiek nie-jednoznaczność czy też trudność w interpretacji cech reprezentujących badany proces.

W przypadku jednak rzeczywistych obiektów technicznych nie zawsze można dysponować tak przejrzystymi wynikami pomiarów. Często też nie istotny jest sam fakt zidentyfikowania i sklasyfikowania wyraźnej formy obrazu zarejestrowanego w ustalonych warunkach pracy urządzenia.

Dla większości złożonych obiektów technicznych np. turbogeneratorów, identyfikacja zmiany ich stanu technicznego możliwa jest w wyniku oceny charakterystyk wybiegowych czy też robiegowych t.j. charakterystyk (obrazów) rejestrowanych w trakcie niestabilnych stanów pracy obiektu. Dokonywane jest wówczas porównanie bieżącego obrazu (tworzonego przez określoną przestrzeń wybranych cech) z analogicznym obrazem

sporządzonym wcześniej, kiedy to stan maszyny uznawany był za prawidłowy. Zidentyfikowane odstępstwa analizowanego obrazu od jego wzorca świadczą o zaistniałej zmianie stanu technicznego.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki zastosowania (opracowanej przez autora) metody amplitudowo-fazowej aproksymacji sygnałów do tworzenia trójwymiarowych obrazów drgań względnych wału maszyny wirnikowej.

## 2. AKWIZYCJA DANYCH POMIAROWYCH

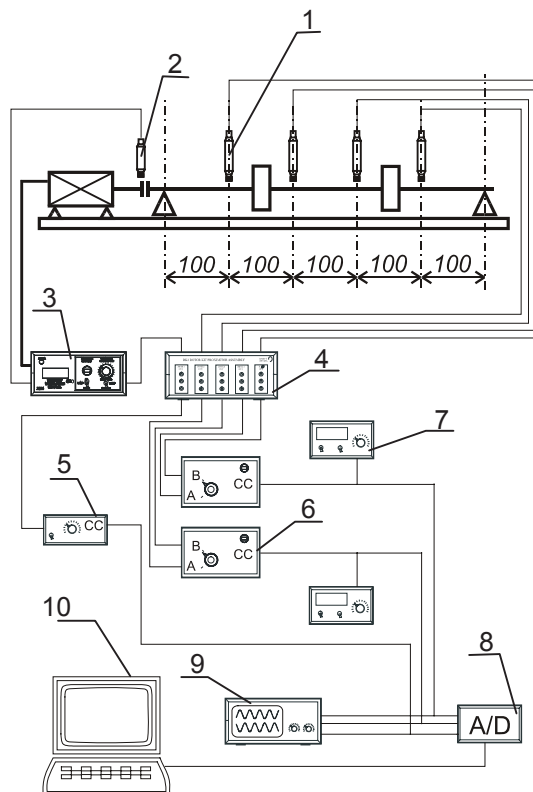
Do testowania, omawianego w pracy, algorytmu aproksymacji amplitudowo-fazowej wykorzystane zostały dane eksperymentalne pochodzące z modelu maszyny wirnikowej, z Laboratorium Diagnostyki Maszyn Instytutu Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej.

W trakcie eksperymentu, za pomocą wiroprowadowych przetworników drgań<sup>1</sup> [12] względnych, rejestrowano cztery sygnały przemieszczenia drgań wału maszyny oraz sygnał znacznika fazy. Akwizycję danych realizowano przy zmieniających kolejno prędkościach obrotowych wirnika – w zakresie od 500 do 8000 obr/min, z przyrostem prędkości 100 obr/min.

Na rys. 2 przedstawiono schemat zastosowanego układu pomiarowego.

Przetworniki drgań (1) (patrz rys. 2) umieszczone były pionowo w czterech równoodległych płaszczyznach pomiarowych usytuowanych pomiędzy dwoma podporami łożyskowymi (odległymi od siebie o 500 mm).

Rejestrowane sygnały napięciowe (o wartościach chwilowych proporcjonalnych do wartości przemieszczenia drgań) przetwarzano analogowo za pomocą układów kondycjonowania sygnału (6). Wykonywano filtrację dolnoprzepustową ( $f_N = 800$  Hz) oraz zmianę wartości składowej stałej i odpowiednie<sup>2</sup> wzmocnienie sygnału – celem dostosowania napięcia do zakresu napięcia wejściowego<sup>3</sup> 12-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego. Spróbkowane sygnały drganiowe rejestrowano w pamięci dyskowej komputera.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego zainstalowanego na modelu maszyny wirnikowej

1. przetworniki drgań względnych wału,
2. przetwornik znacznika fazy
3. układ sterowania prędkością obrotową silnika modelu,
4. układ zasilania przetworników drgań,
5. układ zmiany wartości składowej stałej sygnału znacznika fazy,
6. układ kondycjonowania sygnału (wzmacniacz sygnału, filtr dolnoprzepustowy, filtr górnoprzepustowy, zmiana wartości składowej stałej)
7. woltomierz
8. przetwornik analogowo-cyfrowy
9. oscyloskop
10. komputer rejestrujący próbkowane sygnały

## 3. OCENA MOŻLIWOŚCI WIZUALIZACJI I ANALIZY DANYCH POMIAROWYCH

W rezultacie zrealizowanego eksperymentu uzyskano bazę danych w postaci 152 plików zawierających szeregi czasowe spróbkowanych sygnałów pomiarowych. Każdy z tych plików zawiera przebiegi dwóch sygnałów drganiowych (z dwóch sąsiednich przetworników) oraz przebieg sygnału znacznika fazy – pozwalającego na późniejsze odtwarzanie zarówno względnej jak i bezwzględnej fazy zarejestrowanych drgań.

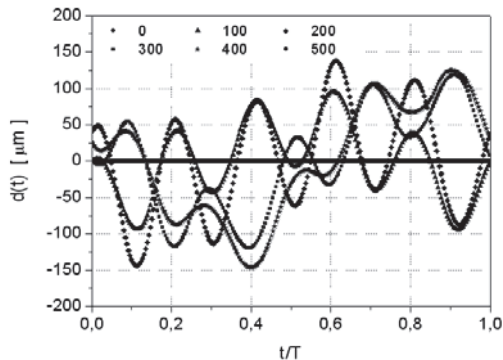
Przykładowe przebiegi czasowe sygnałów zamieszczono na rys. 3. Znajdujące się na tym

<sup>1</sup> Przetworniki wraz układem zasilania firmy BENTLY NEVADA.

<sup>2</sup> Wartości wzmocnień były dobierane w sposób pozwalający na optymalne wykorzystanie dynamiki przetwornika.

<sup>3</sup> 0 ÷ 10V

rysunku wykresy przedstawiają zmiany wartości amplitudy przemieszczenia drgań ( $d$ ) w funkcji czasu ( $t$ ) przypadające na jeden obrót wału – o okresie ( $T$ ).



Rys. 3. Przebiegi czasowe drgań względnych wału zarejestrowane przy prędkości 500obr/min

Jak łatwo zauważyć dominującymi składowymi analizowanych drgań są dwie pierwsze harmoniczne. Sygnały pochodzące z przetworników A i B są w przeciwfazie do sygnałów z przetworników C i D. Biorąc pod uwagę konstrukcję maszyny, z której pochodzą dane pomiarowe łatwo można stwierdzić (obecna przy prędkości 500 obr/min) drugą postać drgań giętnych wału podobną do przedstawionej na rys. 1.b.

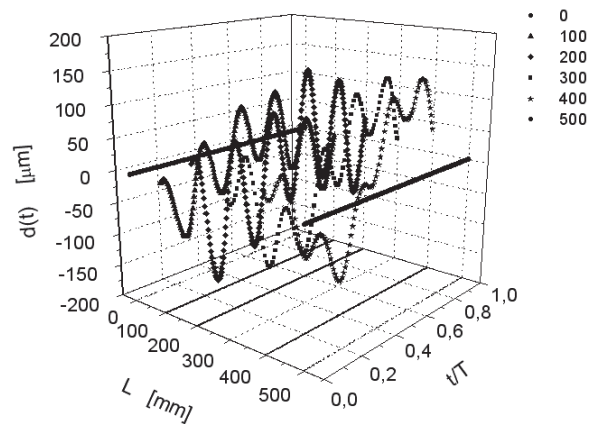
Prezentacja danych pomiarowych w postaci wykresów jak na rys. 3. (jakkolwiek dalej prosta w interpretacji – przynajmniej w przypadku badanego modelu maszyny) nie daje możliwości przestrzennej oceny ugięć wału. Nawet w przypadku analizowanych danych (z nieskomplikowanego modelu maszyny) z wykresów takich trudno jest np. ocenić asymetrię wygięcia wału. Jak zatem interpretować dane pochodzące z rzeczywistego obiektu np. turbogeneratora, którego wał posiada różne średnice, a odległości pomiędzy punktami pomiarowymi nie są jednakowe?

Zastosowanie bezpośredniej prezentacji przebiegów drgań w trójwymiarowym układzie współrzędnych (jak na rys. 4) nie przynosi oczekiwanych efektów. Stworzony w ten sposób obraz analizowanego procesu drganiowego utrudnia, a wręcz uniemożliwia poprawną interpretację danych pomiarowych. Ograniczona ilość punktów pomiarowych liczba przebiegów czasowych drgań uniemożliwia bezpośrednie wykonanie wykresu warstwicowego. Dysponujemy bowiem danymi pozyskanymi ze zdecydowanie różną rozdzielczością w dziedzinie czasu i przestrzeni. W omawianym przypadku jest to 6 wartości wektora przestrzeni i 512 wektora czasu.

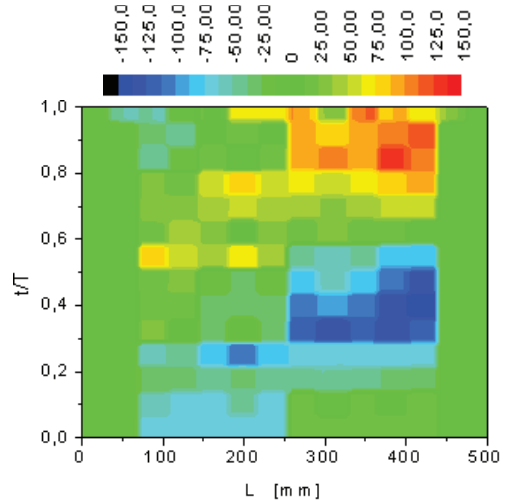
Zastosowanie aproksymacji czy też interpolacji danych metodami nie uwzględniającymi obecności przesunięć fazowych pomiędzy przetwarzanymi sygnałami zniekształca obraz analizowanego

procesu, czego przykładem są wykresy warstwicowe przedstawione na rys. 5, 6 oraz 7. Wykresy te sporządzono na podstawie tego samego zbioru danych co w przypadku rys.3 i 4, z wykorzystaniem metod aproksymacyjnych programu OriginPro7.

W pierwszym przypadku zastosowano metodę korelacyjną uzyskując obraz przedstawiony na rys. 5.



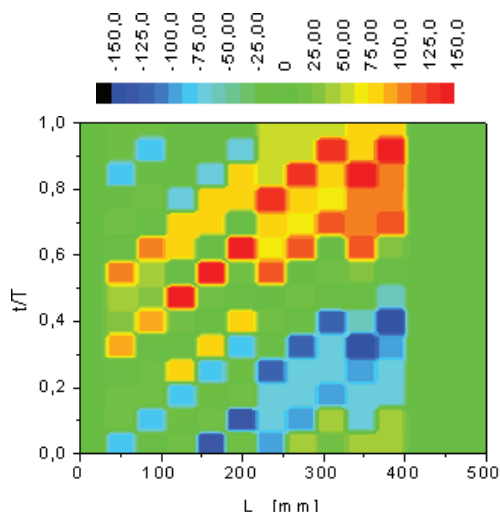
Rys. 4. Przebiegi drgań względnych wału zarejestrowane przy prędkości 500obr/min



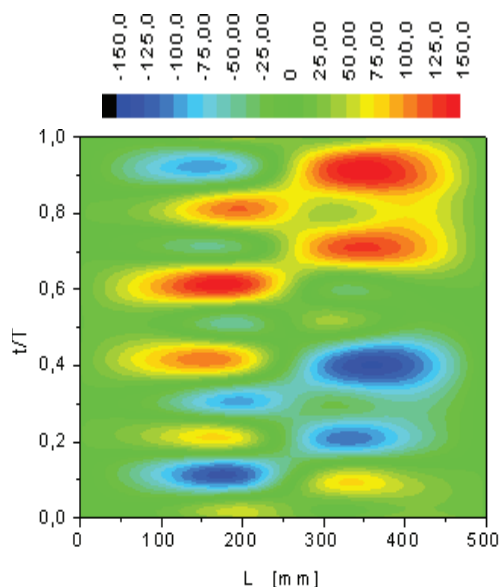
Rys. 5. Warstwicowy obraz drgań względnych wału. Dane aproksymowane metodą korelacyjną

Wykres ten, jakkolwiek daje pogląd na ogólny stan drganiowy badanego obiektu, bowiem można w przybliżeniu określić kierunki ugięcia wału oraz stwierdzić asymetrię tych ugięć, praktycznie nie nadaje się do identyfikacji zmian stanu technicznego urządzenia.

W wyniku przetwarzania danych wejściowych praktycznie wyeliminowane zostały składowe sygnałów o częstotliwościach wyższych niż 1 harmoniczna (1X).



Rys. 6. Warstwiczny obraz drgań względnego wału. Dane aproksymowane metodą średnich ważonych



Rys. 7. Warstwiczny obraz drgań względnego wału. Dane aproksymowane metodą Renka-Cline

Podobnie zły efekt uzyskano przy zastosowaniu aproksymacji metodą średnich ważonych (patrz rys. 6). Również i w tym przypadku obraz badanego procesu jest bardzo mało precyzyjny i praktycznie pozbawiony informacji niesionych przez składowe sygnału o częstotliwościach wyższych od 1X.

Stosunkowo najlepszy wynik uzyskano stosując metodę Renka-Cline – rys. 7 choć i w tym przypadku stworzony obraz ma raczej charakter poglądowy.

#### 4. AMPLITUDOWO-FAZOWA APROKSYMACJA SYGNAŁÓW

Jak już wcześniej wspomniano zbyt duże dysproporcje pomiędzy liczbą elementów określających wektory analizowanej przestrzeni cech uniemożliwiały bezpośrednie tworzenie wykresów warstwicznych obrazujących poziom drgań względnych wału. Brak właściwej interpretacji przesunięć fazowych przy przetwarzaniu sygnałów pomiarowych prowadził z kolei do istotnego zniekształcenia obrazu analizowanego procesu.

Wykorzystanie jednak informacji o przesunięciach fazowych pomiędzy sygnałami z sąsiadujących płaszczyzn pomiarowych pozwala przyjąć założenie możliwości stosowania amplitudowo-fazowej aproksymacji danych.

Przedstawiona w pracy metoda bazuje na założeniach, że:

- wejściowe szeregi danych są reprezentacją procesu mającego charakter okresowy i są próbkowane synchronicznie;
- istnieje możliwość wyznaczenia funkcji korelacji pomiędzy sąsiadującymi ze sobą szeregami czasowymi danych pomiarowych.

Algorytm opisany poniżej zakłada dodatkowo, że zarówno amplituda jak i faza pomiędzy sąsiadującymi ze sobą szeregami czasowymi danych zmienia się w sposób liniowy. Ogólnie jednak algorytm ten można byłoby dostosować do użycia w nim innych funkcji aproksymujących czy też interpolujących zmiany amplitudy i fazy.

##### 4.1. Algorytm aproksymacji amplitudowo-fazowej

1. Na podstawie przebiegów czasowych  $x_{li}(t)$  oraz  $x_{li+1}(t)$  pochodzących z sąsiadujących ze sobą punktów pomiarowych obliczana jest funkcja kowariancji:

$$\hat{c}_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} (x_{li,t} - \bar{x}_l)(x_{li+1,t+k} - \bar{x}_{li+1}) \quad (4.1)$$

gdzie :

$N$  – ilość próbek przetwarzanych szeregów czasowych,

$k$  – dystans korelacyjny ( $k = 0, 1, 2, \dots, K$  przy czym  $K \leq N/4$ ).

$l_i$  –  $i$ -ta współrzędna przestrzenna

2. Odnajdywana jest maksymalna wartość funkcji  $\hat{c}_k$ ;

dystans korelacyjny  $k$ , przy którym  $\hat{c}_k$  osiąga wartość maksymalną jest interpretowany jako kąt przesunięcia fazowego pomiędzy rozpatrywanymi sygnałami pomiarowymi (jako faza względna – przyjmująca wartości  $0 \div \pm\pi$ ).

3. Dokonywane jest przesunięcie sygnału  $x_{li+1,t}$  o wartość kąta fazowego  $k$  wg. zależności:

$$x'_{li+1,t} = x_{li+1,t-k} \quad (4.2)$$

przy czym  $k$  przyjmuje wartości  $0 \div \pm lp/2$ , gdzie  $lp$  jest liczbą próbek przypadającą na 1 okres składowej podstawowej sygnału.

4. Na podstawie odpowiadających sobie wartości  $x_{l_i,t}$  oraz  $x'_{l_{i+1},t}$  obliczane są wartości  $x_{\lambda_j,t}^j$

$$x_{\lambda_j,t}^j = g(\lambda_j) \quad (4.3)$$

gdzie:

$\lambda_j$  - jest  $j$ -tą współrzędną z przedziału pomiędzy  $l_i$  oraz  $l_{i+1}$ ,

$g(\lambda_j)$  - funkcja aproksymująca, której współczynniki obliczono w oparciu o wartości  $x_{l_i,t}$  oraz  $x'_{l_{i+1},t}$ .

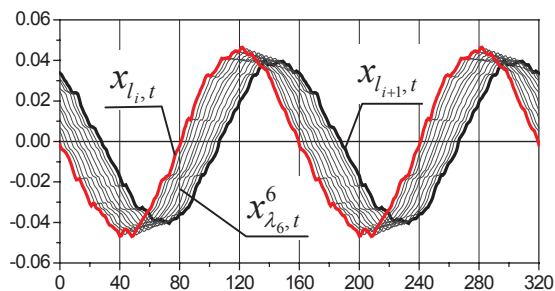
5. Dla kolejnych ( $j$ ) szeregów czasowych, których wartości obliczono w punkcie 4 dokonywane jest przesunięcie fazowe o kąt

$$\xi = \frac{k(l_{i+1} - l_i)}{\lambda_j - l_i} \quad (4.4)$$

wg zależności:

$$x'_{\lambda_j,t} = x_{\lambda_j,t+\xi}^j \quad (4.5)$$

Na rys. 8 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe sygnałów pomiarowych, ilustrujące algorytm aproksymacji amplitudowo-fazowej.

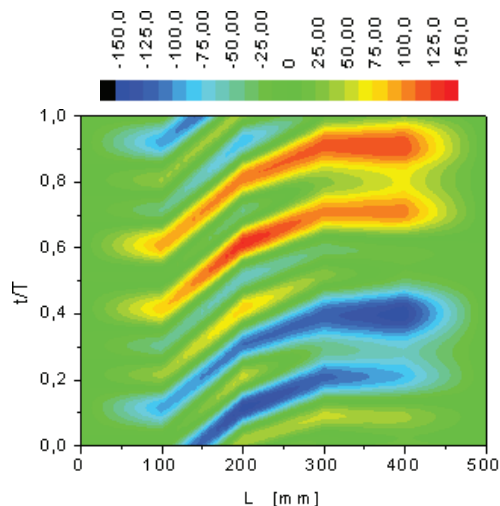


Rys. 8. Ilustracja algorytmu amplitudowo-fazowej aproksymacji sygnałów

Przebiegi czasowe oznaczone symbolami  $x_{l_i,t}$  oraz  $x_{l_{i+1},t}$  są wynikiem próbkowania danych pomiarowych. Jak widać są one przesunięte względem siebie o kąt wynoszący około  $3/8\pi$ . Bazując zatem na założeniu liniowej zmiany amplitudy oraz fazy pomiędzy przebiegami pochodzącymi z sąsiednich punktów pomiarowych możliwe jest wygenerowanie praktycznie dowolnej

liczby przebiegów dla współrzędnych pośrednich. Na rys. 8. przebiegi czasowe wygenerowane za pomocą omawianego algorytmu zaznaczono cieńszymi liniami.

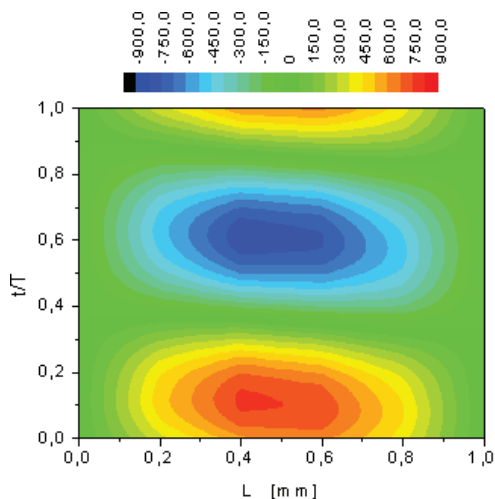
Zastosowanie omówionego powyżej algorytmu do aproksymacji danych pomiarowych pozwoliło osiągnąć zdecydowaną poprawę jakości wykresów warstwicznych odzwierciedlających stan analizowanego procesu drganiowego. Przykłady tworzonych w ten sposób obrazów przedstawiono na rys. 9, 10 oraz 11.



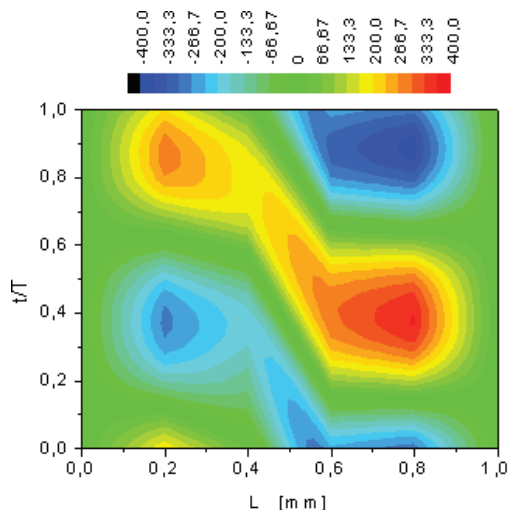
Rys. 9. Obraz drgań względnych wału przy prędkości 500 obr/min

Rys. 9 przedstawia stan drganiowy wału przy prędkości wynoszącej 500 obr/min. Jest on więc stworzony na podstawie tego samego zestawu danych pomiarowych co w przypadku rys. 3 do 7. Widać na nim wyraźną dominację dwóch pierwszych harmonicznych drgań oraz asymetrię ugięcia wału. Widzimy dalej, że wraz ze wzrostem odległości od sprzęgła wyraźnie wzrasta opóźnienie fazowe drgań rejestrowanych w poszczególnych punktach pomiarowych, a w przeciwfazie do sygnału z przetwornika A są sygnały z przetworników C i D.

Rys. 10 obrazuje stan drganiowy wału przy prędkości wynoszącej 2400 obr/min, który jak widać jest zupełnie inny niż omawiany poprzednio. Amplituda drgań, w których obecna jest praktycznie tylko składowa podstawowa, jest prawie sześć razy większa. Sygnały ze wszystkich punktów pomiarowych praktycznie posiadają zgodność fazową (widoczne jest nieznacznie, że sygnały z punktów C i D wyprzedzają sygnały z punktów B i A). Bez problemu identyfikujemy rezonansowy charakter obecnych drgań, przy obecności pierwszego modu drgań (patrz rys. 1.a).



Rys. 10. Obraz drgań względnych wału przy prędkości 2400 obr/min



Rys. 11. Obraz drgań względnych wału przy prędkości 5700 obr/min

Rys. 11 przedstawia natomiast drgania wału przy prędkości 5700 obr/min, w takcie tzw. przejścia przez rezonans. Podobnie jak przy 2400 obr/min także i w tym przypadku dominującą jest pierwsza harmoniczna drgań, przy czym amplitudy są o połowę mniejsze. Bez problemu zidentyfikować można drugi mod drań, z charakterystycznym przesunięciem fazowym wynoszącym  $180^\circ$ .

W przeciwieństwie jednak do stanu drganiowego wału występującego przy prędkości 500 obr/min tym razem sygnały z punktów C i D wyprzedzają sygnały rejestrowane w punktach A i B.

## 6. PODSUMOWANIE

Wyniki uzyskane w takcie badań pozwalają stwierdzić, że testowana metoda okazuje się być skutecznym narzędziem aproksymacji zbiorów cech pomiarowych, których wartości zmieniają się

w sposób amplitudowo-fazowy. Pomimo, wynoszącej dwa rzędy wielkości, różnicy pomiędzy liczbą danych pozyskanych w dziedzinie czasu i przestrzeni zastosowanie aproksymacji amplitudowo-fazowej pozwoliło skutecznie zniwelować te dysproporcje, co w efekcie dało możliwość tworzenia trójwymiarowych obrazów stanu analizowanego procesu.

Zastosowanie do oceny stanu drganiowego wału wykresów warstwicznych pozwala z kolei na zwiększenie możliwości identyfikacji zmian stanu technicznego monitorowanego obiektu. Bez problemu bowiem można na tego typu wykresach nanosić np. obszary akceptowalności zarówno amplitudy jak i fazy drgań. Przez dołożenie do analizowanej przestrzeni cech czwartego wymiaru, którym jest czas, mamy możliwość identyfikacji zmian stanu technicznego zarówno w ustalonych jak i niestalonych warunkach jego pracy.

## LITERATURA

- [1] MITCHELL J. S., *Introduction to Machinery Analysis and Monitoring*, Pennwell Books, Tulsa, Oklahoma 1993.
- [2] TANDON N., CHOUDHURY A., *A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings*, Tribology International 32, str. 469-470, 1999.
- [3] R. B. W. HENG, AND M. J. M., *Statistical Analysis of Sound and Vibration Signals for Monitoring Rolling Element Bearing Condition*. Applied Acoustics 53, str. 211-226, 1998.
- [4] MIETTEN J., and ANDERSON P., *Acoustic emission of bearings lubricated with contaminated grease*, Tribology International 33, str. 777-787, 2000.
- [5] EISEMMANN R., EISEMMANN R., *Machinery malfunction diagnosis and correction*, Hewlett Packard Company, 1998.
- [6] MUSZYNSKA A. *Multimode Whirl and Whip in Rotor/Bearing Systems, Dynamics of Rotating Machinery*, Proceedings of the Second International Symposium on Transport Phenomena, Dynamics, and Design of Rotating Machinery, v.2, str. 269-283, Hemisphere Publishing Corporation, Honolulu, Hawaii 1988.
- [7] WYSOGLĄD B., *Przykłady zastosowania transformaty falkowej do analizy sygnałów drgań łożysk tocznych*, Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference Congress of Technical Diagnostics, 2000.
- [8] NIKOLAOU N. and ANTONIADIS I., *Demodulation of rolling element bearing vibration signals using the continuous Wavelet transform*, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, str. 635-643, 2001.

- [9] TADEUSIEWICZ R., LASIŃSKI M., *Rozpoznawanie obrazów*, PWN, Warszawa,
- [10] KURZYŃSKI M., *Rozpoznawanie obrazów. Metody statystyczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.
- [11] PIĄTKOWSKI J., *Pomiar względnej i bezwzględnej fazy drgań*, Laboratorium z Diagnostyki Technicznej Maszyn, praca zbiorowa pod redakcją W. Elsnera, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2001.
- [12] ELSNER W., PIĄTKOWSKI J., *Instrukcja obsługi układu Rotor-Kit oraz systemu ADRE*, opracowanie wewn. Instytut Maszyn Ciepłych. PCz. 2001.



Dr inż. **Jacek  
PIĄTKOWSKI**  
Instytut Informatyki  
Teoretycznej i Stosowanej,  
Politechniki Częstochowskiej  
ul. Dąbrowskiego 73  
42-200 Częstochowa,  
e-mail: [jacekp@icis.pcz.pl](mailto:jacekp@icis.pcz.pl)