#### Bogdan WYSOGLAD, Anna TIMOFIEJCZUK

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

# ROZWÓJ METOD ANALIZY SYGNAŁÓW WIBROAKUSTYCZNYCH STOSOWANYCH W DIAGNOSTYCE MASZYN

Streszczenie. Jednym z podstawowych pojęć w diagnostyce maszyn jest sygnał diagnostyczny, będący nośnikiem informacji umożliwiającym przekazanie wiadomości o stanie obserwowanej maszyny. W artykule przedstawiono przegląd metod analiz sygnałów wibroakustycznych stosowanych i opracowanych w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej, wykorzystywanych głównie w diagnostyce maszyn wirnikowych. Pierwsza część artykułu jest opisem sygnałów rejestrowanych podczas badań maszyn wirnikowych oraz rodzajów eksperymentów diagnostycznych. W części tej zawarto także krótki przegląd metod analizy takich sygnałów. W kolejnej części artykułu opisano metody czasowo-częstotliwościowej analizy sygnałów z zastosowaniem krótkoczasowej transformacji Fouriera i transformacji falkowej, które są stosowane do analizy sygnałów niestacjonarnych, głównie sygnałów rejestrowanych w przejściowych warunkach działania maszyny. W końcowej części artykułu przedstawiono metody analizy sygnałów dwuwymiarowych, opisujących trajektorie ruchu czopa w łożysku hydrodynamicznym z zastosowaniem reprezentacji zespolonej.

# DEVELOPMENT OF METHODS OF VIBROACOUSTICAL SIGNAL ANALYSIS APPLIED IN TECHNICAL DIAGNOSTICS

Summary. A signal is considered to be one of the basic terms of technical diagnostics. It is treated as a carrier of information about the state of an observed object. The paper deals with the review of methods of diagnostic signal analysis applied and elaborated in Department of Fundamentals of Machinery Design of Silesian University of Technology. Presented methods are mainly applied in diagnostics of rotating machinery. In the first part of the paper time-frequency methods were described, which are applied to analysis of nonstationary signals. The second part is devoted to the analysis of two-dimensional signals. Examples of such signals are trajectories of the centre of shaft neck in hydrodynamic bearings.

# 1. Wstęp

Diagnostyka maszyn jako odrębna dziedzina nauki, przede wszystkim eksploatacji maszyn, rozwinęła się w Polsce ponad 30 lat temu. Obszerny przegląd rozwoju diagnostyki

technicznej w Polsce zawarto w [11]. Podstawowym zadaniem tej dyscypliny była od początku identyfikacja stanu obiektu technicznego. Pierwsze badania diagnostyczne polegały najczęściej na demontażu obiektu oraz określaniu różnymi metodami stopnia zużycia jego podzespołów oraz niesprawności, wynikających z określonych warunków działania. Badania te często wymagały także ingerencji w strukturę obiektu poprzez montaż czujników naprężeń lub drgań. Znaczny postęp technik pomiarowych, technik komputerowych oraz metod analizy procesów obserwowanych podczas działania obiektów technicznych pozwala obecnie na bezinwazyjną diagnostykę prowadzoną w czasie normalnego ich działania. Oprócz nieniszczącego charakteru badania takie mają wiele zalet. Obserwacji mogą wtedy podlegać zarówno *procesy użyteczne*, jak i wytworzona energia czy ciśnienie medium roboczego, procesy związane z działaniem obiektu, czego przykładem są prędkość obrotowa elementów wirujących, temperatura substancji smarujących, ale przede wszystkim tak zwane *procesy resztkowe*, które są niezamierzonym efektem działania maszyny, a które zawsze towarzyszą temu działaniu. Przykładami takich procesów są drgania i hałas. Obserwowane procesy nazywa się w diagnostyce maszyn *sygnalami*.

Bardzo obszerny i interesujący przegląd metod diagnostyki technicznej stosowanych w diagnostyce różnych obiektów technicznych zawarto w najnowszej monografii, poświęconej tej tematyce, "Inżynieria diagnostyki maszyn" pod redakcją profesorów Czesława Cempla i Bogdana Żółtowskiego [50]. Kolejne rozdziały monografii opracowane zostały przez przedstawicieli polskich ośrodków naukowo-badawczych, wiodących w dziedzinie diagnostyki maszyn. Należy podkreślić, że w monografii zawarto także opracowania wielu osób, które z polską diagnostyką techniczną związane są od początku jej rozwoju.

Szczególnym przypadkiem diagnostyki technicznej jest diagnostyka maszyn obejmująca między innymi zagadnienia określania stanu technicznego maszyn energetycznych (np. silników, pomp, sprężarek, turbin). Jednym z obszarów diagnostyki maszyn jest diagnostyka maszyn wirnikowych. Maszyna wirnikowa to środek techniczny, w którym wyróżnia się zespół wykonujący ruch obrotowy, noszący nazwę wirnika. Zespół ten posadowiony jest w podporach zawierających łożyska ślizgowe lub toczne. Określanie stanu technicznego maszyn wirnikowych może być realizowane na kilka sposobów.

Sygnały analizowane w ramach opisywanych badań maszyn wirnikowych są najczęściej sygnałami wibroakustycznymi. Artykuł dotyczy przede wszystkim metod analizy sygnałów wykorzystywanych w diagnostyce maszyn wirnikowych. Opisano w nim przegląd sposobów analizy sygnałów obserwowanych podczas badania tych maszyn. Szczegółowo opisano metody opracowane w Katedrze PKM Politechniki Śląskiej.

# 2. Charakterystyka rejestrowanych sygnałów

Przez sygnał rozumie się *przebieg dowolnej wielkości* fizycznej, mogącej być nośnikiem informacji [13,16]. Działania, których celem jest wyznaczenie *cech sygnalów*, nazywa się

analizą sygnalu. Cechą sygnalu nazywa się uporządkowaną parę {nazwa cechy, wartość cechy} [16] lub {atrybut cechy, wartość cechy} [31].

Sygnały, będące podstawą identyfikacji stanu technicznego obiektu, dzieli się na sygnały, których momenty statystyczne nie zależą od czasu, nazywane *sygnalami stacjonarnymi* i sygnały nie spełniające warunku stacjonarności, nazywane *sygnalami niestacjonarnymi*. Sygnałem stacjonarnym w szerszym sensie nazywa się sygnał, którego wartość oczekiwana jest stała i równa wartości średniej, a funkcja autokorelacji zależy tylko od przesunięcia czasowego τ, co opisują następujące zależności [6, 33, 41]:

 $E\{x(t)\} = idem(t) = \mu_x$  $R_{xx}(t_1, t_1 + \tau) = R_{xx}(t_2, t_2 + \tau) = R_{xx}(\tau) \forall t_1$ 

Stacjonarność w węższym sensie związana jest ze spełnieniem analogicznych warunków niezależności od czasu dla momentów statystycznych wyższych rzędów. Stwierdzenie niestacjonarności sygnału w szerszym sensie jest wystarczające do uznania sygnału za niestacjonarny.

Wyróżnia się trzy główne przyczyny niestacjonarności sygnałów [6] [16]:

 zmienna w czasie wartość średnia; przykład modelu matematycznego takiego sygnału opisuje równanie:

$$x(t) = A(t) + \cos(2\pi t f + \varphi),$$

gdzie: A(t) jest liniowym trendem addytywnym, a  $\cos(2\pi f)$  sygnałem harmonicznym,

 zmienna w czasie wartość średniokwadratowa; przykładem modelu matematycznego takiego sygnału może być równanie:

 $x(t) = A_1 os(2\pi t f + \varphi) \cdot A_2 \cos(2\pi t f + \varphi)$ 

 zmienna w czasie struktura widmowa; przykład modelu matematycznego takiego sygnału określa zależność:

$$x(t) = Aos(2\pi t f(t) + \varphi) \tag{4}$$

Należy podkreślić, że dane niestacjonarne wymagają specjalnych metod ich analizy, a interpretacja wyników analizy takich sygnałów jest często bardzo trudna.

(1)

93

(3)

(2)

Sygnały rejestrowane podczas badań maszyn wirnikowych są zawsze niestacjonarne. Najczęściej charakteryzują się one kilkoma rodzajami niestacjonarności jednocześnie.

## 3. Sygnaly wibroakustyczne stosowane w diagnostyce maszyn wirnikowych

Przyczyną powstawania drgań w przepływowych maszynach wirnikowych są głównie niesprawności wirnika [34]. Najczęściej są to niewyrównoważenie oraz wygięcia lub anizotropia sztywności wału. Drgania wirnika przekazywane są przez łożyska na korpus, a następnie na fundament. Odkształcenia fundamentu mogą z kolei deformować korpus maszyny, a także zmieniać "osiowość" całego zespołu. W maszynach przepływowych wirnik i korpus są dodatkowo pobudzane do drgań ruchem medium roboczego.

Z wymienionych przyczyn drgań maszyny wirnikowej wynika, że wibroakustyczne badania diagnostyczne można prowadzić z wykorzystaniem następujących sygnałów wibroakustycznych [13]:

- drgań czopów wirnika względem panewek łożysk,
- drgań bezwzględnych panewek, obsady lub korpusów łożysk,
- drgań bezwzględnych fundamentów,
- pulsacji ciśnienia medium roboczego w różnych punktach układu przepływowego.

O przydatności poszczególnych sygnałów w diagnostyce decydują konstrukcja maszyny i sposób generowania zjawisk wibroakustycznych w tej maszynie oraz założony ceł badań. Podczas badań wibroakustycznych maszyn wirnikowych najczęściej obserwowane są sygnały prędkości lub przyśpieszeń drgań bezwzględnych głównie korpusu i fundamentu oraz przemieszczeń względnych wału względem panewki łożyska.

Należy zwrócić uwagę na różnicę między pomiarem (wielkości) przemieszczeń bezwzględnych (absolutnych) a pomiarem (wielkości) przemieszczeń względnych. Przy pomiarze drgań bezwzględnych obserwowany jest ruch punktu pomiarowego w bezwzględnym układzie odniesienia. Przy pomiarze przemieszczeń względnych wirnika punktem odniesienia czujnika jest jego obudowa, najczęściej sztywno przymocowana do obudowy łożyska lub korpusu maszyny.

Prowadzenie obserwacji drgań jednym czujnikiem drgań bezwzględnych lub przemieszczeń względnych dostarcza informacji o drganiach w kierunku odpowiadającym kierunkowi osi czujnika. Sygnał taki nazywany jest sygnalem jednowymiarowym.

Zastosowanie dwóch czujników przemieszczeń względnych o osiach wzajemnie prostopadłych, leżących na płaszczyźnie prostopadłej do osi wału, umożliwia otrzymanie dwóch sygnałów przemieszczeń wału w kierunkach umownie nazywanych poziomym i pionowym. Stanowią one pełny opis przemieszczeń wału w płaszczyźnie promieniowej [47], niemożliwy do otrzymania przy zastosowaniu jednego czujnika. Sygnały zarejestrowane w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach mogą być poddawane osobno analizom jako dwa sygnały jednowymiarowe. Można również analizować je wspólnie jako sygnał dwuwymiarowy, opisujący trajektorię ruchu środka czopa względem panewki łożyska.

# 4. Reprezentacja wiedzy diagnostycznej i relacja diagnostyczna

Głównym zadaniem diagnostyki technicznej jest identyfikacja stanu obserwowanego obiektu. Zadanie to jest realizowane na podstawie wyników analizy sygnałów diagnostycznych oraz na podstawie wiedzy dotyczącej badanych obiektów. Wiedza ta może być różnie reprezentowana. Sposoby gromadzenia i zapisu wiedzy są przedmiotem wielu opracowań [17,26,29,36].

Metody reprezentacji wiedzy dzieli się na reprezentację za pomocą języka naturalnego oraz za pomocą zbioru symboli [17,26]. Przykładem pierwszej grupy metod jest wiedza zapisana w postaci opisów literaturowych. Ze względu na złożony charakter opisów w języku naturalnym ten sposób reprezentacji wiedzy jest nieprzydatny w komputerowych systemach diagnostyki maszyn wrinikowych. Dla potrzeb takich systemów stosuje się reprezentację wiedzy w postaci symbolicznej. Wyróżnia się zapis wiedzy w postaci proceduralnej i *deklaratywnej*. Proceduralna reprezentacja wiedzy polega na zapisie w postaci procedur lub algorytmów określających sposób postępowania podczas realizacji określonego zadania. Przykładem zapisu proceduralnego może być sposób postępowania prowadzący do identyfikacji określonego rodzaju uszkodzenia obiektu technicznego. W przypadku tym procedura będzie określała kolejność testów i analizy określonych sygnałów diagnostycznych. Deklaratywna reprezentacja wiedzy polega na zapisie wiedzy w postaci *stwierdzeń* lub *regul*. Przykładami tego sposobu reprezentacji wiedzy są bazy danych.

Badania literaturowe wykazują, że do najczęściej stosowanych sposobów reprezentacji wiedzy w systemach diagnostyki maszyn wirnikowych należą reguły. *Regulą* nazywa się następujący zapis [17]:

#### IF przesłanka THEN konkluzja

Części reguły nazywane *przesłanką* i *konkluzją* mogą być zapisywane w postaci stwierdzeń w formie podstawowej, stwierdzeń dynamicznych (reguły dynamiczne) lub przybliżonych (reguły przybliżone). Reguły stosowane w diagnostyce maszyn nazywane są *relacjami diagnostycznymi*. Przykładami typowych relacji diagnostycznych wykorzystywanych w diagnostyce maszyn wirnikowych są:

Poziom składowej IX w widmie IF drgań podwyższony THEN W układzie występuje niewyrównoważenie W widmie drgań występuje IF składowa 2X (poziom podwyższony) THEN W układzie występuje nieosiowość lub przeciążenie; wymagane badanie fazy drgań na końcach wału

W widmie drgań występuje IF składowa 0.5X (poziom podwyższony)

THEN

W układzie występuje przycieranie lementów wirujących o elementy nieruchome

W części konkluzji może wystąpić nie tylko wniosek w postaci diagnozy, ale zalecenie wykonania dodatkowych testów. W tym przypadku reguła nosi nazwę reguły dzialania.

W sygnałach obserwowanych podczas działania maszyn wirnikowych identyfikuje się składowe, będące wielokrotnościami składowej równej częstotliwości obrotów (składowe nadharmoniczne) i składowe, będące podwielokrotnościami tej składowej (składowe podharmoniczne). Składowe nadharmoniczne mogą być wynikiem wystąpienia przeciążeń, nieosiowości, pęknięć elementów wirujących, poluzowania się śrub fundamentowych, uszkodzenia łożysk tocznych lub przekładni zębatych. Składowe podharmoniczne są często efektem wystąpienia przycierania elementów wirujących o korpus czy niestabilności działania lożysk hydrodynamicznych [12,13,34].

# 5. Rodzaje eksperymentów diagnostycznych

Sygnały diagnostyczne (np. wiborakustyczne) mogą być wynikiem różnie realizowanych eksperymentów diagnostycznych. Przez eksperyment diagnostyczny rozumie się szereg operacji związanych z obserwacją, rejestracją i analizą sygnałów diagnostycznych, które są odpowiedziami na określone wymuszenie [14]. Rozróżnia się trzy rodzaje eksperymentów diagnostycznych [49]:

- eksperyment czynny, który polega na obserwacji odpowiedzi obiektu technicznego na wymuszenie, które można zmieniać podczas realizacji eksperymentu. Można także ingerować w strukturę badanego obiektu. Zmiana wymuszenia jest realizowana poprzez zmianę parametrów stanu lub sterowania obiektu;
- eksperyment bierny, podczas którego zmiana parametrów stanu i sterowania jest niemożliwa;
- eksperyment mieszany, nazywany w literaturze eksperymentem czynno-biernym, podczas którego nie jest możliwa zmiana parametrów stanu i sterowania, ale znane są wartości tych parametrów w określonych chwilach czasu.

Z punktu widzenia diagnostyki eksploatacyjnej maszyn najbardziej interesujące są takie metody identyfikacji stanu obiektu, które mogą być realizowane w ramach eksperymentów biernego lub mieszanego. Do najczęściej wykonywanych badań diagnostycznych maszyn wirnikowych należą badania wykonywane w czasie normalnego ich działania. Szczególnym przypadkiem są badania wykonywane w warunkach rozruchu i wybiegu. W takich przypadkach nie istnieje konieczność stosowania zewnętrznych wzbudników drgań.

## 6. Metody analizy sygnałów

Jako przykłady opracowań związanych z ogólnie rozumianą analizą sygnałów należy wymienić: [1,2,5,6,9,10,28,35,38,39,41,44,46]. W większości wymienionych prac autorzy omawiają jednak przede wszystkim metody analizy sygnałów pod warunkiem ich stacjonarności, poświęcając sygnałom niestacjonarnym znacznie mniej uwagi. Do najważniejszych opracowań uwzględniających analizę sygnałów niestacjonarnych należy zaliczyć [6] (metody nieparametryczne) i [41] (metody parametryczne). Trudno także przy obecnym rozwoju nauki oraz różnorodności przetwarzanych danych niestacjonarnych opracować uniwersalne zasady dotyczące analizy wszystkich rodzajów sygnałów niestacjonarnych. Możliwe jest natomiast zebranie pewnych metod charakterystycznych dla wąskiej grupy problemów. Przykładami monografii zawierającymi opisy takich metod są: [3,7,15,23,32]. Bardzo obszerny przegląd takich metod zawarto również w [50].

Sygnały rejestrowane podczas omawianych badań diagnostycznych maszyn wirnikowych są zawsze niestacjonarne z co najmniej dwóch powodów wymienionych w punkcie 2 referatu. Zastosowanie określonych sposobów analizy sygnałów jest przede wszystkim uzależnione od charakteru sygnału i celu analizy. Metody te można podzielić na *parametryczne* i *nieparametryczne* [26,42]. Metody parametryczne polegają na identyfikacji modelu sygnału, który jest zwykle opisywany za pomocą niewielkiej liczby parametrów równania matematycznego. Przykładami są metody: ARMA, ARIMA, ARMAX i NARMAX oraz ich odmiany [9,15,21,39,44].

Nieparametryczne metody analizy sygnałów polegają na wyznaczaniu jego cech w postaci funkcji czasu lub częstotliwości. Wartości funkcji są wyznaczane za pomocą metod statystycznych lub metod bazujących na przekształceniach sygnałów. Wynikiem zastosowania tych metod jest opis sygnału w dziedzinach czasu, amplitudy lub częstotliwości.

Analiza sygnałów niestacjonarnych, szczególnie takich, które charakteryzują się kilkoma rodzajami niestacjonarności, wymaga specjalnych metod estymacji, uwzględniających to, że cechy statystyczne sygnału są funkcjami czasu. Nie istnieje jeden uniwersalny sposób analizy sygnałów niestacjonarnych. W większości przypadków nadrzędnym celem ich analizy jest identyfikacja składowych harmonicznych sygnału oraz określenie ich częstotliwości, amplitudy i fazy początkowej. Polega to przede wszystkim na identyfikacji zmian tych składowych w funkcji czasu i częstotliwości. Zagadnienie to jest także głównym celem diagnostyki wibroakustycznej maszyn. Większość nieparatmetrycznych metod analizy danych niestacjonarnych polega na podziale sygnału na podrealizacje, które można uznać za stacjonarne, co pozwała na zastosowanie, w dalszej kolejności, metod analizy danych

stacjonarnych. Wyniki estymacji są następnie porządkowane w czasie zgodnie z kolejnością ich wyznaczania, zapisywane w postaci macierzy i prezentowane w postaci wykresów trójwymiarowych.

Należy podkreślić, że analiza sygnałów niestacjonarnych jest bardzo obszernym zagadnieniem. Metody estymacji takich sygnałów zależą przede wszystkim od celu analizy. Spośrd bardzo dużej grupy metod opisywanych w literaturze na szczególną uwagę zasługują metody pozwalające na czasowo-częstotliwościową reprezentację sygnałów. Przykładem tak wyznaczanych cech sygnałów są charakterystyki czasowo-częstotliwościowe w postaci spektrogramów lub skalogramów [4,12,13,30,37,42,43].

#### 7. Metody wyznaczania charakterystyk czasowo-częstotliwościowych

Jedną z pierwszych metod pozwalających na czasowo-częstotliwościową reprezentację sygnału, stosowaną w diagnostyce maszyn wirnikowych, była analiza sygnałów drganiowych oparta na krótkoczasowym przekształceniu Fouriera (ang. Short Time Fourier Transform, STFT) [13,30,43,50]. Metoda ta stosowana jest także obecnie w wielu systemach diagnostyki tych maszyn. Wady tej metody, wynikające z jej założeń, sposodowały, że kilka lat temu sygnały rejestrowane podczas działania maszyn wirnikowych zaczęto analizować za pomocą metody opartej na przekształceniu falkowym (ang. Wavelet Transform, WT) [4,37,42,43,50]. Wynikiem tej analizy jest również reprezentacja czasowo-częstotliwościa, ale jej interpretacja jest odmienna w porównaniu z analizą opartą na STFT.

#### 7.1. Analiza oparta na STFT

Przekształcenie Fouriera jest podstawą wielu metod analizy sygnałów, a także innych rodzajów przekształceń [5,6,9,16,28,34]. Zgodnie z teorią Fouriera każdy sygnał można przedstawić za pomocą liniowej kombinacji funkcji harmonicznych, które nazywane są składowymi harmonicznymi sygnału. Przejście z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości polega na zastosowaniu transformaty Fouriera zgodnie z zależnością:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(t) \exp(-j2\pi) dt, \qquad (5)$$

gdzie:  $R_{xx}$  jest funkcją autokorelacji sygnału x. Funkcja S jest wyznaczana w przedziale  $(-\infty,\infty)$  i jest nazywana dwustronnym widmem. Analiza sygnałów niestacjonarnych z zastosowaniem tego przekształcenia to przede wszystkim metoda oparta na krótkoczasowym przekształceniu oraz jej odmiana - analiza śledząca rzędów. Metody te prowadzą do wyznaczania charakterystyk trójwymiarowych, pozwalających na identyfikację struktury

sygnału oraz zmienności amplitudy i częstotliwości składowych sygnału w czasie. Zastosowanie analizy opartej na STFT zakłada możliwość podziału sygnału na krótkie odcinki czasu, w których sygnał można uznać za stacjonarny [16, 28, 30]. Metoda jest realizowana w dwóch krokach, na które składają się:

- podział sygnału na jego stacjonarne podrealizacje,
- wyznaczenie widma kolejnych podrealizacji,

co można zapisać za pomocą następującego wyrażenia [30,37,42,43]:

$$S(t,f) = \int x(t)w(\tau-t)e^{-j2\pi}dt,$$

(6)

gdzie: x(t) jest analizowanym sygnałem,  $w(\tau-t)$  jest funkcją okna, a  $\tau$  parametrem określającym przesunięcie okna wzdłuż realizacji sygnału (parametr translacji). Funkcją bazową przekształcenia STFT może być tylko funkcja harmoniczna. Wyniki analizy opartej na STFT prezentuje się w postaci *wykresów kaskadowych* lub w postaci *wykresów warstwicowych* nazywanych *spektrogramami*. Wartości amplitudy sygnału oznacza się wtedy kolorami. Wykresy warstwicowe pozwalają na obserwację zmian amplitudy i częstotliwości składowych sygnału. Należy podkreślić, że zmiany te nie są możliwe do identyfikacji podczas estymacji pojedynczych widm wyznaczanych dla całej realizacji sygnału. Określenie tych zmian jest możliwe, ponieważ funkcja, będąca wynikiem zastosowania krótkoczasowej transformaty Fouriera, zależy od dwóch argumentów - czasu i częstotliwości. Jej wartości są wynikiem mnożenia realizacji sygnału przez funkcję okna, która jest przesuwana w czasie. Transformata Fouriera wyznaczana jest dla podrealizacji sygnału zawierającej się w oknie. Na rysunku 1 pokazano przykład spektrogramu sygnału zaobserwowanego podczas działania turbosprężarki.



Do najważniejszych problemów analizy opartej na STFT należy określenie długości stacjonarnych podrealizacji sygnału, co jest jedną z głównych wad tego przekształcenia. Należy podkreślić, że chociaż analiza prowadząca do czasowo-częstotliwościowej reprezentacji sygnału pozwala na identyfikację wielu sympotmów niesprawności, to interpretacja skalogramów jest w wielu przypadkach trudna.

## 7.2. Analiza śledząca rzędów

Analiza śledząca rzędów jest stosowana w analizie sygnałów odznaczających się cyklicznością oraz takich sygnałów, w których identyfikowane są składowe proporcjonalne względem jednej określonej częstotliwości [24,25,43].

*Rzędami* nazywa się kolejne harmoniczne proporcjonalne do częstotliwości obrotów. Istotą analizy rzędów jest identyfikacja tych składowych, które są związane ze zmienną częstotliwością obrotów. Jeżeli zjawisko podczas działania maszyny występuje dwa razy na obrót, to składowa, będąca symptomem tego zjawiska, widoczna jest jako drugi rząd w widmie rzędów. Linie na charakterystyce odpowiadające składowym proporcjonalnym do częstotliwości obrotów są do siebie równoległe. Jeżeli częstotliwość składowej nie jest proporcjonalna do tej częstotliwości, to linia odpowiadająca tej składowej przechodzi przez kolejne rzędy.



Rys. 2. Przykład wyników analizy śledzącej rzędów Fig. 2. Example of results of order tracking analysis

#### 7.3. Analiza oparta na WT

Analiza oparta na przekształceniu falkowym jest obecnie jedną z najbardziej popularnych metod sygnałów niestacjonarnych [4,8,19,20,22,27,37,42,43]. Odpowiedni dobór funkcji bazowych przekształcenia falkowego pozwala również na zastosowanie tej metody w diagnostyce maszyn. Można wymienić wiele publikacji poświęconych tej analizie. Do podstawowych opracowań zagranicznych zaliczyć należy [19,20]. Z punktu widzenia podstaw matematycznych przekształcenia falkowego na szczególną uwagę zasługuje opracowanie [8].

Bardzo interesujące zastosowanie analizy falkowej w diagnostyce maszyn opisano w [4]. *Ciągle przeksztalcenie falkowe* definiuje się jako:

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) x(t) dt, \qquad (7)$$

gdzie: a nazywane jest skalą (odwrotność częstotliwości), b jest przesunięciem w dziedzinie czasu funkcji bazowej, x(t) jest analizowanym sygnałem, a  $\psi((t-b)/a)$  funkcją bazową przekształcenia falkowego. Argumenty funkcji bazowej, oznaczone tutaj przez a i b, mogą w tym przypadku przyjmować wartości ze zbioru liczb rzeczywistych. Przykład skalogramu dla sygnału zarejestrowanego podczas działania turbosprężarki pokazano na rys. 3.



- Rys. 3. Przykład wyników analizy opartej na WT dla sygnalu zarejestrowanego podczas działania turbosprężarki [42]
- Fig. 3. Example of results of analysis based on WT of a signal recorded during operation of turbcompressor [42]

Zmiany argumentów funkcji bazowej przekształcenia polegają, jak poprzednio, na przesuwaniu funkcji bazowej wzdłuż realizacji sygnału w dziedzinie czasu oraz zmianie długości jej nośnika. Pierwsza z tych operacji odpowiada w analizie STFT operacji podziału sygnału na stacjonarne podrealizacje. Druga operacja nie ma tam swojego odpowiednika. Biorąc pod uwagę fakt, że zmiany skali powodują zmiany nośnika funkcji w dziedzinie czasu oraz to, że pole okna czasowo-częstotliwościowego jest stałe, nośnik tej funkcji w dziedzinie częstotliwości (widmo funkcji bazowej) ulega także zmianie. Wyniki analizy falkowej prezentuje się zwykle w postaci wykresów warstwicowych, nazywanych *skalogramami*, gdzie kolor oznacza miarę podobieństwa podrealizacji sygnału do zastosowanej funkcji bazowej.

Analiza falkowa, w porównaniu z analizą opartą na STFT, odznacza się możliwością identyfikacji za pomoca jednego skalogramu składowych wąsko- i szerokopasmowych. Jest to związane ze zmienną rozdzielczością częstotliwościową tej analizy. Cecha ta uważana jest za jedną z najważniejszych z punktu widzenia analizy sygnałów, takich jak te obserwowane podczas działania maszyn wirnikowych.

Należy podkreślić, że analiza STFT, daje w wyniku rozkład mocy sygnału w pasmach częstotliwości. Wyniki analizy opartej na WT są zbiorem współczynników falkowych, które nie mogą być traktowane jako rozkład mocy, a są interpretowane jako miara podobieństwa sygnału do danej funkcji bazowej. Stąd interpretacja charakterystyk czasowoczęstotliwościowych uzyskanych przy zastosowaniu dwóch opisanych metod jest odmienna.

Jednym z celów badań przeprowadzonych w KPKM było znalezienie optymalnej funkcji bazowej dla sygnałów o strukturze charakterystycznej w obserwacji maszyn wirnikowych. Literatura dotycząca analizy falkowej nie zawiera zaleceń dotyczących doboru tych funkcji. Nie opisuje się także, jak oceniać uzyskane z zastosowaniem tych funkcji wyniki. Podczas realizacji badań wyniki analizy falkowej przy zastosowaniu wymienionych funkcji bazowych oceniono za pomocą wprowadzonej oceny [42,43].

Najlepsze wyniki w analizie sygnałów o charakterze sygnałów rejestrowanych podczas działania maszyn wirnikowych otrzymano stosując funkcję bazową, która jest wynikiem mnożenia funkcji harmonicznej i funkcji Gaussa, nazwanej gasin.

	14		<b>S</b> EHS	CYCER:	a la sic	1.1		123
		man				en sur	man	. iion
Course .	ANYON O			in the second	000000	3346000	in the second	-
A.C.	3.52	2.08	3033	14.565	188	North S	Sag	Nggis
2,723	3624	Sta M	300.000	12/2018	0.02	Ways	0.000	1632.61
S. Roser	229	Services.	2017500	\$220-19	and a	0.000.0	100000	Sec.
1966	ship	No.	STATES OF	42.000	88.25V		1.000	CONCERCION OF
14.0	1920		0.10.2	9 E 39	22/25	× 25 8	222	203
1020	10.00		A 46%		10245	120	1. C. S.	100
100	140	10.00	1.1	Sent?	5.5	2260		Sec.
1		min	illini	Sec.	inno		anni	Sec. 2
10000	Carrier St	******	1031000	10.20		STORES STORES		-110:00

Rys. 4. Przykład wyników analizy opartej na WT bez synchronizacji skali z częstotliwością sygnału [42]

Fig. 4. Example of results of analysis based on WT without synchronization of scale and frequency [42]

Zastosowanie analizy falkowej wraz z analizą RSL, opisaną w kolejnym punkcie artykułu, wymaga między innymi synchronizacji zmian parametrów analizy ze zmianami częstotliwości charakterystycznych. Parametrem poddawanym tej synchronizacji jest w tym przypadku skala *s*. Wyniki analizy sygnału wygenerowanego na podstawie modelu matematycznego odpowiadającego strukturze sygnałów rejestrowanych podczas obserwacji maszyn wirnikowych poakazno na rys. 4 i 5. Rysunki przedstawiają wyniki zastosowania jako funkcji bazowej złożenia funkcji harmonicznej i funkcji Gaussa.

Wyniki pokazane na rys. 4 uzyskano bez zastosowania synchronizacji. Na rysunku 5 pokazano wyniki z zastosowanim synchronizacji skali z częstotliwością podstawową sygnału.



Rys. 5. Przykład wyników analizy opartej na WT z synchronizacją skali z częstotliwością sygnału [42] Fig. 5. Example of results of analysis based on WT with synchronization of scale and frequency [42]

Rysunki pokazują, że synchronizacja tych parametrów wpływa także w znacznym stopniu na wyniki analizy, przede wszystkim na możliwość poprawnej identyfikacji poszczególnych składowych.

## 8. Metoda analizy charakterystyk czasowo-częstotliwościowych

Rozróżnienie symptomów diagnostycznych identyfikowanych podczas analizy sygnałów może być zrealizowane z zastosowaniem analizy RSL [18]. Metoda RSL jest sposobem analizy charakterystyki czasowo-częstotliwościowej, która może być uzyskana zarówno z zastosowaniem analizy opartej na STFT, jak i na WT. Charakterystyka jest rozpatrywana jako funkcja częstotliwości bezwzględnej (składowe rezonansowe sygnału) oraz jako funkcja częstotliwości względnej, czyli częstotliwości odniesionej do częstotliwości obrotów elementów wirujących (składowe reprezentatywne sygnału). Głównym założeniem analizy RSL jest to, że struktura rejestrowanego sygnału wynika ze zjawisk będących efektem wzbudzeń okresowych i własności rezonansowych maszyny. Schematyczny sposób analizy charakterystyki rozruchowej pokazano na rys. 6.

Oś pozioma na rys. 6 została opisana przez częstotliwości środkowe pasm  $f_j$  wyznaczane przy stałej względnej szerokości pasma. Oś pionowa związana jest z czasem obserwacji i na rysunku została opisana przez kolejne wartości częstotliwości obrotów  $f_n$ .

- Zbiór <u>W</u> jest przekrojem charakterystyki przy  $f_n = idem$ . Identyfikowane symptomy są odpowiednio wynikiem wzbudzeń rezonansowych (składowe rezonansowe <u>R</u> sygnału przekrój charakterystyki przy  $f_j = idem$ ),
- okresowych (składowe reprezentatywne <u>S</u>sygnału przekrój charakterystyki przy  $f_n / f_j = idem$ ).



Rys. 6. Schemat charakterystyki czasowo-częstotliwościowej [18] Fig. 6. Scheme of time-frequency characteristics [18]

Zastosowanie analizy RSL jest związane z założeniem, że wartości parametru charakterystycznego, w tym przypadku wartości częstotliwości charakterystycznej, dla każdego zbioru <u>W</u> są równe kolejnym częstotliwościom środkowym pasm lub kolejnym wartościom współczynnika skali w przypadku charakterystyki wyznaczonej z zastosowaniem analizy falkowej. Założenie to zostało schematycznie pokazane na rys. 7 [42,43]. Składowa sygnału o zmiennej częstotliwości równej częstotliwości charakterystycznej to symptom zależny od zmienności warunków działania. Składowa sygnału, której częstotliwość jest stała, jest symptomem diagnostycznym niezależnym od zmienności warunków działania. Na rysunku pokazano także efekt rozdzielenia symptomów, w wyniku czego uzyskuje się sygnał rezonansowy oraz sygnał reprezentatywny.





Analiza RSL jest stosowana zarówno dla wyników w postaci spektrogramów, jak i skalogramów. Ogólna koncepcja rozdzielenia symptomów w przypadku analizy STFT i WT

jest taka sama. Różnica wynikająca z zastosowania analizy RSL dla danych uzyskanych po obydwu rodzajach analizy polega na sposobie, w jaki traktowane są wartości cech oznaczonych przez <u>W</u>. W analizie Fouriera <u>W</u> oznacza kolejne widma sygnału. W analizie falkowej <u>W</u> jest zbiorem współczynników falkowych określających miarę podobieństwa podrealizacji sygnału do funkcji bazowej o określonej częstotliwości (skali). Różnica między tymi reprezentacjami polega głównie na tym, że widmo (przy określonym sposobie jego przedstawienia) można traktować jako sumę <u>S</u> i <u>R</u>, a współczynnik falkowy wyznaczony w określonej chwili czasu i określonej wartości skali może być traktowany jako wynik mnożenia odpowiednich współczynników falkowych składowych [42,43].

# 9. Metody analizy sygnałów dwuwymiarowych

Większość potencjalnych niesprawności maszyn wirnikowych to uszkodzenia wirnika i węzłów łożyskowych. Powoduje to, że dla celów diagnostyki technicznej najwięcej informacji o stanie maszyny wirnikowej niosą ze sobą drgania jej wirnika. Najpełniejszy opis tych drgań stanowi trajektoria ruchu (przemieszczeń względnych) środka czopa w obrębie luzu promieniowego łożyska hydrodynamicznego.

Zastosowanie dwóch czujników przemieszczeń względnych o osiach wzajemnie prostopadłych, leżących na płaszczyźnie prostopadłej do osi wału, umożliwia otrzymanie dwóch sygnałów stanowiących pełny opis przemieszczeń wału w plaszczyźnie promieniowej. Przyjęto, że uporządkowana para sygnałów przemieszczeń wału x(t) i y(t) zarejestrowanych jednocześnie w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach stanowi sygnał dwuwymiarowy. Sygnał dwuwymiarowy umożliwia obserwację trajektorii ruchu środka czopa w łożysku hydrodynamicznym.

Trajektorie ruchu środka czopa obserwowane są od dawna jako symptomy stanu technicznego maszyn wirnikowych. W literaturze [6] opisywane są typowe relacje diagnostyczne między stanem technicznym maszyny wirnikowej (jej niesprawnościami) a symptomami tego stanu, będącymi cechami trajektorii.

#### 9.1. Przyjęty sposób analizy trajektorii

Podczas realizacji prac w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn zmierzających do stworzenia systemu doradczego wspomagającego diagnozowanie turbozespołów wyłonił się problem uwzględnienia w tym systemie znanych relacji diagnostycznych między stanem maszyny a cechami trajektorii. Dla potrzeb takiego systemu wszystkie uwzględniane cechy trajektorii, oceniane dotychczas subiektywnie na podstawie obserwacji trajektorii, należy sformalizować i wyznaczać automatycznie.

W badaniach przyjęto zapis sygnału dwuwymiarowego opisującego trajektorię w postaci funkcji zespolonej. Przyjmując, że sygnał x(t) jest częścią rzeczywistą, a sygnał y(t) urojoną, drgania środka czopa można zapisać w postaci zespolonej  $z(t) = x(t) + j \cdot y(t)$ . Wówczas płaszczyznę, w której opisywana jest trajektoria, można rozpatrywać jako płaszczyznę zespoloną.

Opracowano [48] metody identyfikacji wprowadzonych cech trajektorii w dziedzinie czasu w oparciu o analizy korelacyjne oraz w dziedzinie częstotliwości na podstawie zespolonej transformacji Fouriera. Uwzględniono następujące cechy trajektorii :

- okresowość, okres trajektorii,
- zwrot kierunku wirowania punktu na trajektorii,
- położenie kątowe trajektorii względem osi pionowej,
- cechy trajektorii prawie okresowych,
- oceny podobieństwa kształtu dwu trajektorii, oceny zmian kształtu trajektorii,
- oceny przynależności trajektorii do klas kształtu odpowiadających określonym niesprawnościom,
- położenie znacznika wyróżnionego położenia kątowego wału,
- widma gęstości mocy i zastępcze widma amplitudowe sygnału zespolonego opisującego trajektorię,
- cechy składowych częstotliwościowych trajektorii: wielkość, kształt, kierunek wirowania.
   Poniżej jako przykłady opracowanych w KPKM metod analizy sygnałów dwuwymiarowych przedstawiono:
- w dziedzinie czasu metody korelacyjne do oceny podobieństwa kształtu trajektorii.
- w dziedzinie częstotliwości dwustronne widmo sygnału zespolonego opisującego trajektorię.

#### 9.2. Analiza ksztaltu trajektorii

Najczęściej analizowaną cechą trajektorii jest jej kształt. Kształt trajektorii od dawna wykorzystywany jest jako symptom stanu technicznego maszyny wirnikowej.

Podczas porównywania kształtu dwu trajektorii istnieje problem zdefiniowania miary podobieństwa kształtu dwu trajektorii, wynikający z subiektywnego charakteru pojęcia kształtu. Założono, że metoda badania podobieństwa dwu trajektorii centralnych powinna uwzględniać fakt, że porównywane trajektorie są sygnałami będącymi funkcjami czasu oraz dawać wyniki niezależne od:

- różnicy wielkości porównywanych trajektorii;
- obrócenia trajektorii względem siebie o dowolny kąt (wartość ewentualnego kąta obrotu powinna zostać zidentyfikowana);
- przesunięcia sygnałów wzdłuż osi czasu polegającego na tym, że początki obydwu trajektorii nie są odpowiadającymi sobie punktami.

Do ilościowego oceniania podobieństwa kształtu dwu trajektorii wykorzystano funkcję korelacji wzajemnej sygnałów zespolonych. Jeżeli  $m(\varphi)$  i  $z(\varphi)$  są sygnałami zespolonymi opisującymi porównywane trajektorie, będące funkcjami drogi kątowej czopa  $\varphi$ , obserwowanymi na odcinku czasu (drogi kątowej wału) o długości  $\Phi$ , funkcję korelacji wzajemnej dwu zmiennych *m* i *z*, będącą funkcją opóźnienia drogi kątowej *v*, można przedstawić wzorem [40, 45]:

$$R_{mz}(\upsilon) = \frac{1}{\Phi} \int_{0}^{\Phi} m(\varphi) \cdot z^{*}(\varphi - \upsilon) d\varphi$$

W badaniach głównie używana jest znormalizowana funkcja korelacji  $r_{mz}(\upsilon)$  odniesiona do wartości autokorelacji funkcji składowych dla zerowej wartości opóźnienia  $\upsilon = 0$ .

(8)

(9)



Rys. 8. Dwie trajektorie o identycznym kształcie, różnej wielkości i obrócone względem siebie o kąt α
Fig. 8. Two identical orbits characterized by the same shape, different size, rotated with respect to each other with an angle α

Na rysunku 8 pokazano przykład dwu trajektorii okresowych o identycznym kształcie, ale różniących się położeniem na płaszczyźnie zespolonej (obróconych względem siebie o kąt  $\alpha$ ). Rysunek 9 przedstawia przebiegi modułu i argumentu funkcji znormalizowanej korelacji wzajemnej jako funkcje drogi kątowej wału. Maksymalna wartość modułu znormalizowanej funkcji korelacji wzajemnej umożliwia ocenę podobieństwa między trajektoriami. Wartość modułu będzie bliska 1, jeżeli porównywane trajektorie będą podobne. Argument funkcji korelacji umożliwia wyznaczenie kąta obrotu  $\alpha$  między porównywanymi trajektoriami. Kąt ten można wyznaczyć na podstawie zależności:

 $\alpha = 2 \cdot \pi \cdot \gamma = 2 \cdot \pi \cdot \operatorname{Arg}(r_{mz} \cdot (\upsilon_1)),$ 

241

gdzie  $\gamma$  jest argumentem funkcji korelacji wyznaczonej dla wartości opóźnienia  $v_1$ , w którym moduł funkcji korelacji osiąga maksimum wartość.

Najczęściej wartość opóźnienia czasowego  $v_1$  nie wnosi żadnej informacji i wynika z różnicy między chwilami rozpoczęcia rejestracji porównywanych trajektorii. Wartość opóźnienia czasowego  $v_1$  jest oceną przydatną z punktu widzenia diagnostyki technicznej, jeżeli chwile rozpoczęcia rejestracji porównywanych trajektorii są synchronizowane sygnałem wyróżnionego położenia kątowego wału. Ma to zastosowanie w przypadku porównywania trajektorii zarejestrowanych równocześnie w kilku łożyskach maszyny lub podczas porównywania trajektorii zarejestrowanych w jednym łożysku dla różnych chwil czasu.

Opracowane oceny podobieństwa trajektorii znalazły zastosowanie do:

- klasyfikacji badanych trajektorii na podstawie ich podobieństwa do wybranych trajektorii wzorcowych. Trajektorie wzorcowe reprezentują klasy kształtu trajektorii odpowiadające określonym niesprawnościom maszyn wirnikowych;
- oceny zmian kształtu trajektorii ruchu środka czopa w wybranym łożysku w funkcji czasu eksploatacji maszyny;
- porównywania trajektorii zarejestrowanych jednocześnie w dwu łożyskach maszyny wirnikowej.

## 9.3. Analiza częstotliwościowa sygnalu zespolonego opisującego trajektorię

Ograniczając analizę drgań wału maszyn wirnikowych do drgań giętnych, opis drgań wału sprowadza się do ruchu środka wału w plaszczyźnie promieniowej. Niesprawności maszyn wirnikowych, takie jak: niewyrównoważenie wirnika, anizotropia sztywności wału, przeciążenie, przycieranie wywołują ruchy precesyjne środka wału wirnika. W ogólnym przypadku ruch wału jest ruchem wypadkowym ruchów pochodzących od występujących niesprawności.

Dla celów opisu i analizy zjawisk obserwowanych za pomocą sygnałów przyporządkowuje się im modele odpowiadające modelom zjawisk fizycznych (obserwowanym drganiom maszyn).

Poniżej omówiono metody analizy częstotliwościowej sygnałów dwuwymiarowych, umożliwiające opis trajektorii zbiorem jego składowych częstotliwościowych (harmonicznych). Umożliwia ono identyfikację cech składowych ruchów precesyjnych środka walu w płaszczyźnie promieniowej. Obecnie składowe częstotliwościowe trajektorii są obserwowane z wykorzystaniem układu składającego się z dwóch filtrów środkowo przepustowych oraz np. oscyloskopu. Składowe te przyjmują kształt zbliżony do elipsy.

Cechy tak otrzymanych składowych częstotliwościowych sygnału dwuwymiarowego wykorzystywane są w relacjach diagnostycznych. Najważniejsze cechy, na które zwracana jest uwaga, to: wielkość, jej kształt (płaskość), kierunek wirowania oraz zmiany położenia znacznika wyróżnionego położenia kątowego wału. Identyfikacja cech składowych dokonywana jest najczęściej przez osobę prowadzącą analizę w wyniku ich obserwacji na ekranie.



Rys. 9. Przebiegi modulu i argumentu znormalizowanej funkcji korelacji wzajemnej trajektorii Fig. 9. Courses of module and argument of normalized correlation of a mutual orbit

Poniżej przedstawiono dwustronne widmo amplitudowe sygnału zespolonego, stanowiące pełny opis ruchu wału w płaszczyźnie promieniowej w dziedzinie częstotliwości. Ciągły sygnał zespolony z(t) o czasie trwania T transformowany jest w szereg wartości  $Z[f_k]$ nazywany widmem zespolonym:

$$Z[f_k] = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} z(t) \cdot \exp(-j2\pi f_k t) dt$$
(10)

Wartości widma są określone dla dyskretnych częstotliwości  $f_k$  o dodatniej i ujemnej wartości. Widmo amplitudowe wyznaczane jest na podstawie zależności  $A[f_k] = |Z[f_k]|$ .

Z własności transformacji Fouriera wynika, że część widma sygnału rzeczywistego odpowiadająca ujemnym częstotliwościom jest powtórzeniem informacji zawartych w części o dodatnich częstotliwościach. Powoduje to, że wykorzystywanym wynikiem analizy sygnałów rzeczywistych jest jedynie jednostronne widmo (określona tylko dla dodatnich częstotliwości).

W przypadku analizy sygnałów zespolonych wartości składowych widma dla ujemnych i dodatnich częstotliwości są różne. Dla sygnałów zespolonych część widma dla ujemnych częstotliwości wnosi dodatkowe informacje, umożliwiające wyznaczanie cech składowych częstotliwościowych trajektorii.

#### 9.4. Interpretacja widma sygnalu zespolonego

Na płaszczyźnie zespolonej k-tej składowej widma zespolonego o częstotliwości  $f_k$ odpowiada wektor o długości równej modułowi składowej, zaczepiony w początku układu współrzędnych i wirujący ze stałą prędkością kątowa (rys. 10) [42]. W przypadku gdy częstotliwość składowej  $f_k$  jest dodatnia, prędkość kątowa ma również wartość dodatnią, co odpowiada kierunkowi obrotu w prawo (przeciwnie do ruchu wskazówek zegara). Gdy  $f_k$  jest ujemna, kierunek obrotu jest przeciwny.

Dwóm składowym widma zespolonego o częstotliwości plus  $f_k$  i minus  $f_k$  odpowiada para wektorów wirujących z jednakowymi co do wartości bezwzględnej prędkościami kątowymi, ale o przeciwnych kierunkach obrotu. Koniec wektora będącego sumą tych wektorów wyznaczony dla kolejnych chwil czasu kreśli na płaszczyźnie zespolonej elipsę (w szczególnych przypadkach okrąg lub odcinek). Dwie składowe widma zespolonego różniące się znakiem częstotliwości opisano składową harmoniczną trajektorii.



- Rys. 10. Ilustracja składowej harmonicznej trajektorii jako sumy składowych widma sygnału zespolonego opisującego trajektorię
- Fig. 10. Harmonic component o f an orbit as a sum of spectrum components of a complex signal describing the orbit

Bezpośrednia obserwacja dwustronnego widma umożliwia ocenę cech jej składowych harmonicznych [48]. Cechy składowej częstotliwościowej trajektorii o częstotliwości  $f_k$  można wyznaczyć z zależności na podstawie wartości składowych widma o częstotliwości plus i minus  $f_k$ .

- O wielkości składowej harmonicznej trajektorii decyduje długość dużej półosi elipsy, będącej wykresem przebiegu czasowego składowej, którą można wyznaczyć jako sumę wartości składowych widma o częstotliwości plus i minus f<sub>k</sub>.
- Zwrot kierunku wirowania składowej harmonicznej trajektorii jest zawsze zgodny ze zwrotem kierunku wirowania składowej dwustronnego widma o większej wartości.

Cechą opisującą kształt składowej harmonicznej trajektorii jest jej płaskość. Skrajnymi przypadkami kształtu składowej są odcinek i okręg. Składowa harmoniczna trajektorii ma kształt zbliżony do okręgu, gdy jedna z opisujących ją składowych widma jest zdecydowanie mniejsza od drugiej. Składowa harmoniczna trajektorii ma kształt zbliżony do odcinka, gdy opisujące ją składowe widma są porównywalnej wartości.

Na rysunku 11 pokazano dwustronne widmo amplitudowe sygnałów zarejestrowane w warunkach przeciążenia. Na podstawie widma można określić cechy składowych ruchów precesyjnych, takie jak: wielkość, kierunek obrotu, kształt.



Rys. 11. Dwustronne widmo amplitudowe sygnału zespolonego zarejestrowanego w warunkach przeciążenia

Fig. 11. Two-side amplitude spectrum of a complex signal recorded during observation of overloading

# 10. Podsumowanie

Podstawą każdej metody analizy sygnału jest przyjęcie odpowiedniego modelu sygnału. Najszersze zastosowanie w diagnostyce mają uniwersalne modele sygnałów niezależne od obserwowanego obiektu i badanych danych (np. reprezentujące sygnał w postaci składowych harmonicznych). Metody te są przedmiotem artykułu, a badania nad rozwojem tych metod prowadzone są od lat w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej.

Obecnie w diagnostyce maszyn intensywnie rozwija się grupa metod analizy sygnałów, która bazuje na założeniu, że model sygnału powinien uwzględniać specyficzne skutki wywołane działaniem i uszkodzeniem badanego obiektu, generującego obserwowane sygnały. Przykładem wykorzystania takich modeli mogą być spośród metod parametrycznych zastosowania modeli ARMAX, które zakładają, że niesiona przez sygnał informacja zmienia się w kolejnych chwilach czasu i (co najważniejsze) przyjęty model umożliwia obserwowanie tych zmian. W przypadku grupy metod nieparametrycznych rozwój metod analizy sygnałów, wykorzystywanych w diagnostyce maszyn wirnikowych, ukierunkowany jest przede wszystkim na zaawansowane metody prowadzące do czasowo-częstotliwościowej reprezentacji sygnału oraz zaawansowanych metod analizy trajektoriii ruchu środka czopa.

#### Literatura

- Adamczyk J., Metody cyfrowej analizy sygnalów wibroakustycznych. Ossolineum, Wrocław 1979.
- 2. Adamczyk J., Krzyworzeka P., Łopacz H., Systemy synchronicznego przetwarzania sygnałów diagnostycznych, Collegium Columbinum, Kraków 1999.
- Bartelmus W., Diagnostyka maszyn górniczych. Górnictwo odkrywkowe. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1998. ISBN 83-7164-129-X.
- Batko W., Ziółko M., Zastosowanie teorii falek w diagnostyce maszyn. Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Kraków 2002.
- 5. Beauchamp K.G., Przetwarzanie sygnałów metodami analogowymi i cyfrowymi, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.
- 6. Bendat J. S., Piersol A. G., Metody analizy i pomiaru sygnalów losowych, PWN, Warszawa 1976.
- 7. Będkowski L., *Elementy ogólnej teorii diagnostyki technicznej*. Rozprawa habilitacyjna, WAT Warszawa 1981.
- 8. Białasiewicz J. T., Falki i aproksymacje, WNT, Warszawa 2000.
- 9. Box G. E. P., Jenkins G. M., Analiza szeregów czasowych: prognozowanie sterowanie sterowanie, PWN, Warszawa 1983.
- 10. Bracewell R., Przeksztalcenie Fouriera i jego zastosowania, WNT, Warszawa 1968.
- Cempel C., Diagnostyka Maszyn Diagnostyka Techniczna Inżynieria Diagnostyczna, XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Sympozjum "Diagnostyka Maszyn", Węgierska Górka 2003.
- 12. Cempel C., Diagnostyka wibroakustyczna maszyn, PWN, Warszawa 1989,
- Cempel C., Tomaszewski F. (red.), Diagnostya maszyn. Zasady ogólne. Przykłądy zastosowań. MCNEMT, Radom 1992.
- Cholewa W., Kaźmierczak J., Diagnostyka techniczna maszyn. Przetwarzanie cech sygnałów. Skrypt nr 1693, Politechnika Śląska, Gliwice 1992.
- 15. Cholewa W., Kiciński J. (red.), *Diagnostyka techniczna. Odwrotne modele diagnostyczne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- Cholewa W., Moczulski W., Diagnostyka techniczna maszyn. Pomiary i analiza sygnalów. Skrypt nr 1758, Politechnika Śląska, Gliwice 1993.
- 17. Cholewa W., Pedrycz W., Systemy ekspertowe, Politechnika Śląska, Gliwice 1987.
- Cholewa W., Metoda oceny sygnalu akustycznego przekladni zębatych dla badań konstrukcyjnych. Zeszyt IPKM 22/56, Politechnika Śląska, Gliwice 1974, Cholewa74.
- 19. Chui K. C., An introduction to wavelets, Academic Press, Inc.
- 20. Cohen A., Kovacevic J., *Wavelets: the mathematical background*, Proceedings of the IEEE, vol. 84, nr 4, 1996.

- 21. Czop P., Diagnostic models or fotating machinery under transient operating conditions, Politechnika Śląska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gliwice 2002.
- 22. Daubechies I., *Ten lectures on wavelets*. Society for industrial and applied mathematics, 1992.
- 23. Engel Z., Ochrona środowiska przed drganiami i halasem. PWN, Warszawa 2001.
- Gade S., Herlufsen H., Konstantin-Hansen, Vold H., Corwin-Renner D., Analiza śledząca rzędów, Magazyn nr 3 Bruel & Kjaer.
- 25. Gade S., Herlufsen H., Konstantin-Hansen, Wismer N. J., Order Tracking Analysis, Rewiev No. 2, Bruel & Kjaer, 1995.
- 26. Korbicz J., Kościelny M. J., Kowalczuk Z., Cholewa W., Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania, WNT, Warszawa 2002.
- 27. Kumar A., Fuhrmann D. R., Frazier M., Bjürn D. J., A new transform for timefrequency analysis, The IEEE transactions on signal processing, 1992, vol. 40.
- 28. Lyons R. G., Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2000,
- 29. Moczulski W.: Diagnostyka techniczna. Metody pozyskiwania wiedzy, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2002.
- Moczulski W., Metoda wibroakustycznych badań maszyn wirnikowych w warunkach rozruchu lub zatrzymywania, Politechnika Śląska, Instytut Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gliwice 1984.
- Moczulski W., Metody pozyskiwania wiedzy dla potrzeb diagnostyki maszyn, ZN Pol.Śl., s. Mechanika, z. 130, nr 1382, Gliwice 1997.
- 32. Niziński S., Michalski R., *Diagnostyka obiektów technicznych*. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Warszawa-Sulejówek-Olsztyn-Radom 2002.
- Oppenheim A. V., Schafer R.W., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1979.
- 34. Orłowski Z., Diagnostyka w życiu turbin parowych. WNT, Warszawa 2001.
- Otnes R. K., Enochson L., Analiza numeryczna szeregów czasowych, WNT, Warszawa 1978.
- 36. Pieczyński A., Reprezentacja wiedzy w diagnostycznym systemie ekspertowym, Lubuskie Towarzystwo Naukowe w Zielonej Górze, Zielona Góra 2003.
- 37. Radkowski S., Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa Radom 2002.
- 38. Randall B., Frequency analysis, Bruel & Kjaer, 1987.
- Söderström T., Stoica P., Identyfikacja systemów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1987.
- 40. Southwick D., Using full spectrum plot. Orbit Volume 14, No.4, December 1993, pp.19÷21.

- Szabatin J., Podstawy teorii sygnalów, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2000.
- 42. Timofiejczuk A., *Metody analizy sygnalów niestacjonarnych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
- 43. Timofiejczuk A., Metody badania maszyn wirnikowych w warunkach rozruchu, rozbiegu i wybiegu, ZN Pol.Śl., s. Mechanika, nr 133, Gliwice 1999.
- Uhl T., Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych. WNT, Warszawa, 1997.
- VDI Richlinien 2059/1981, Wellenschwingungen von Turbosätzen. Blatt 1: Grundlagen f
  ür die Messung und Beurteilung.
- 46. Wojnar A., Teoria sygnalów, WNT, Warszawa 1980.
- Wysogląd B, Metoda analizy poprzecznych drgań wałów maszyn wirnikowych w dziedzinie częstotliwości. Materiały XXXVI Sympozjonu PTMTS "Modelowanie w Mechanice". Gliwice, 1997.
- 48. Wysogląd B., Metody reprezentacji drgań walów maszyn wirnikowych w diagnostycznych bazach danych, ZN Pol.Śl., s. Mechanika, z. 126, Gliwice 1996.
- 49. Żółtowski B. and Ćwik B.: Leksykon Diagnostyki Technicznej, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 1996.
- Źółtowski B., Cempel C. (red.), *Inżynieria diagnostyki maszyn*. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.

#### Abstract

One of the most important domains of technical diagnostics is research of rotating machinery (e.g. motors, pumps, compressors, turbines). Rotating machinery is a technical object, which consists of a shaft, making rotary motion. The shaft is founded in bearing supports. Identification of the technical state of this machinery can be performed by means of vibroacoustical signals, which are the greatest source of information about the machine. In the paper a review of methods of diagnostic signal analysis was presented. Special emphasize was put on these methods, which were elaborated, developed and applied in Department of Fundamentals of Machinery Design (DFMD) of Silesian University of Technology.