ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Bogdan WYSOGLAD

METODY REPREZENTACJI DRGAŃ WAŁÓW MASZYN WIRNIKOWYCH W DIAGNOSTYCZNYCH BAZACH DANYCH

MECHANIKA z. 126

GLIWICE 1996

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Nr 1347

Bogdan WYSOGLAD

METODY REPREZENTACJI DRGAŃ WAŁÓW MASZYN WIRNIKOWYCH W DIAGNOSTYCZNYCH BAZACH DANYCH

Wedeweitten Feliettelli Statie a. Kejereda S. 46 - 103 Clivice

GLIWICE

I presidently to address "MR 1995 " tempters presides a strate president

1996

OPINIODAWCY

Dr hab. inż. Stanisław Drobniak - prof. nadzw. Politechniki Częstochowskiej Prof. dr hab. inż. Jan Kiciński

KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY	-	Prof. dr hab. inż. Jan Bandrowski
REDAKTOR DZIAŁU	-	Dr hab. inż. Andrzej Buchacz Prof. Politechniki Śląskiej
SEKRETARZ REDAKCJI	-	Mgr Elżbieta Leśko

REDAKCJA Mgr Kazimiera Rymarz

REDAKCJA TECHNICZNA Alicja Nowacka

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Śląskiej

Publikacja finansowana przez Komitet Badań Naukowych z grantu nr 7T07B01108

PL ISSN 0434 - 0817

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej ul. Kujawska 3, 44 - 100 Gliwice

 Nakl. 250+53
 Ark. wyd. 11
 Ark. druk. 10
 Papier offset. kl. III 70 x 100, 80 g

 Oddano do druku 19. 11. 1996
 Podpis. do druku 21. 06. 1996
 Druk ukończ. w listopadzie 1996

Fotokopie, druk i oprawę wykonal "ROLEK", Gliwice, ul. Kazimierza Wielkiego 4

Zeszyt zawiera moją pracę doktorską, napisaną pod kierunkiem prof. dra hab. inż.Wojciecha Cholewy, którą obroniłem przed Radą Wydziału Mechanicznego Technologicznego w czerwcu 1996 roku. W opracowaniu zostały uwzględnione uwagi recenzentów pracy doktorskiej: prof. dra hab. inż. Jana Kicińskiego i prof. dra hab. inż. Jana Kosmola. Zeszyt wydano w ramach grantu promotorskiego nr 7T07B01108 pt."Trajektoria ruchu środka czopa jako symptom stanu technicznego łożysk hydrodynamicznych", finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

Składam serdeczne podziękowania promotorowi prof. Wojciechowi Cholewie, recenzentom pracy doktorskiej i zeszytu, profesorom Janowi Kosmolowi, Janowi Kicińskiemu i Stanisławowi Drobniakowi oraz Koleżankom i Kolegom z Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej za okazaną mi pomoc i życzliwość podczas wykonywania pracy.

Bogdan Wysoglad

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	14
1 WSTEP	17
1 1 Diagnostyka maszyn wirnikowych	17
1.2. Przyczyny drgań wieników	18
1.3 Obserwacia drgań wirników	20
1.4. Zastosowanie svgnałów promieniowych przemieszczeń wzglednych	
czopa w diagnostyce maszyn wirnikowych	
1.5. Bazy danych diagnostycznych systemów doradczych	
1.6. Cel i tezy pracy	
2. DRGANIA WZGLEDNE WAŁÓW	
2.1. Czas	
2.2. Trajektoria przemieszczeń czopa	
2.3. Trajektoria względna, trajektoria centralna	
2.4. Rząd trajektorii	
2.5. Techniki pomiaru promieniowych przemieszczeń względnych wałów	
2.5.1. Czujniki bezdotykowe	
2.5.2. Lokalizacja i montaż czujników bezstykowych	
2.6. Składowa stała i zmienna sygnału promieniowych przemieszczeń względ	nych36
2.7. Ocena dokładności pomiaru przemieszczeń względnych	
2.7.1. Źródła odchyłek pomiarowych	
2.7.2. Ograniczanie wpływu stanu powierzchni wału na wyniki pomiarów	
2.8. Pomiary towarzyszące	
2.8.1. Identyfikacja wyróżnionego położenia kątowego wału wirnika	
2.8.2. Identyfikacja wyróżnionych położeń	
2.8.3. Pomiar prędkości obrotowej wirnika	
3. PODSTAWOWE CECHY TRAJEKTORII	
3.1. Cechy sygnałów	
3.2. Analizy sygnałów składowych	
3.3. Podstawowe cechy trajektorii centralnych	
3.3.1. Obserwacja trajektorii centralnych	
3.3.2. Cechy punktowe	
3.3.3. Stosowane obecnie metody analizy częstotliwościowej trajektorii	
3.4. Podstawowe cechy trajektorii niecentralnych	
3.5. Uśrednianie synchroniczne	

4. CECHY TRAJEKTORII CENTRALNYCH	
4.1. Wstęp	
4.2. Rodzaje trajektorii	
4.2.1. Trajektorie harmoniczne	
4.2.2. Trajektorie poliharmoniczne	
4.2.3. Trajektorie prawie okresowe	
4.2.4. Trajektorie słabo okresowe	
4.2.5. Trajektorie losowe	
4.3. Okres trajektorii	
4.3.1. Pojęcie okresu trajektorii okresowej	
4.3.2. Zastosowanie funkcji autokorelacji do badania okresowości trajektor	ii
centralnej	
4.4. Klasyfikacja kształtu trajektorii	
4.4.1. Pojęcie podobieństwa kształtu trajektorii	
4.4.2. Metoda klasyfikacji kształtu trajektorii centralnych	
4.4.3. Trajektorie wzorcowe	
4.4.4. Funkcja korelacji wzajemnej trajektorii	
4.4.5. Interpretacja funkcji korelacji wzajemnej	
4.5. Analiza trajektorii w dziedzinie częstotliwości	73
4.5.1. Przyjęty sposób analizy trajektorii w dziedzinie częstotliwości	73
4.5.2. Transformacja Fouriera sygnału zespolonego	75
4.5.3. Geometryczna interpretacja widma sygnału zespolonego	77
4.5.4. Gęstości widmowe	
4.5.5. Estymacja gęstości widmowej techniką cyfrową	
4.5.6. Przyjęty model trajektorii w dziedzinie częstotliwości	
4.6. Zwrot kierunku obrotu punktu na trajektorii	
	50
5. PRZYKŁADY ANALIZ	
5.1. Dane wejściowe	
5.2. Przykłady wyników analiz sygnałów zarejestrowanych w warunkach	
przeciążenia	88
5.3. Przykłady wyników analiz sygnałów zarejestrowanych w warunkach	00
przycierania	
5.4. Przykłady wynikow analiz sygnałow zarejestrowanych w warunkach	
rezonansu	
6. ZASTOSOWANIE WYZNACZANYCH CECH TRAJEKTORII	
6.1. Zastosowanie wyników analiz korelacyjnych	
6.1.1. Ocena okresowości trajektorii	
6.1.2. Zastosowanie ocen podobieństwa dwu traiektorii	100

6.2. Zastosowanie wyników analizy częstotliwościowej	101
6.2.1. Składowe harmoniczne trajektorii	101
6.2.2. Określanie cech składowych harmonicznych trajektorii na podstawie	e widm
trajektorii	103
6.2.3. Zastosowanie widm trajektorii do zapisu relacji diagnostycznych	105
7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	109
7.1. Uzyskane wyniki	109
7.2. Wnioski	
7.3. Plan dalszych badań	
DODATKI	117
Dodatek A. Dyskretyzacja sygnału dwuwymiarowego	119
Dodatek B. Algorytm wyznaczania okresu trajektorii	122
Dodatek C. Algorytm identyfikacji kształtu trajektorii	124
Dodatek D. Okna czasowe danych	127
Dodatek E. Błędy estymacji gęstości widmowych sygnału zespolonego	
Dodatek F. Algorytm wyznaczania widmowych gęstości mocy	
Dodatek G. Kryteria oceny stanu maszyn wirnikowych na podstawie	
przemieszczeń względnych wałów	
t of the hajestory in a second demander and the second of the hajest of the	F2.4. Ord.
	147

LITERATURA	143
STRESZCZENIA	148

CONTENTS

List of main symbols	14
	1
1. INTRODUCTION	
1.1. Diagnostics of rotating machinery	17
1.2. Causes of rotors vibrations	18
1.3. The observation of rotor vibrations	20
1.4. The using of signals of radial relative displacements of rotor shaft in diagnostic	
research of rotating machinery	23
1.5. Data base of diagnostic expert systems	24
1.6. The purpose and the thesis of the work	26
2. RELATIVE ROTOR VIBRATIONS	28
2.1. Time	28
2.2. The trajectory of shaft displacements	29
2.3. The relative trajectory and the central trajectory	30
2.4. Order of the trajectory	
2.5. The technics of measures of radial relative shaft displacements	
2.5.1. Noncontacting transducers	
2.5.2. Location and mounting methods of noncontacting transducers	
2.6. Constant and variable component of relative displacements signal	
2.7. Evaluation of measuring accuracy of relative displacements	
2.7.1. Sources of measure deviation	
2.7.2. Reduction of influence of shaft surface texture on measuring accuracy	
2.8. Accompany measures	
2.8.1. Identification of discriminate angular position of the rotor	
2.8.2. Identification of discriminate angular positions of the rotor	
2.8.3. The measure of shaft rotational speed	
or and real about a new addense of the power of a second of	
3. BASIS CHARACTERISTICS OF TRAJECTORIES	
3.1. Characteristics of signals	
3.2. The analysis of component signals	
3.3. Basis characteristics of central trajectories	
3.3.1. The observation of central trajectories	
3.3.2. Numerical characteristics	
3.3.3. Methods at present use for frequency analysis of trajectories	
3.4 Basis characteristics of no-central trajectories	50

3.5. Synchronous averaging	52
4. CHARACTERISTICS OF CENTRAL TRAJECTORIES	53
4.1. Introduction	53
4.2. Kinds of trajectories	54
4.2.1. Harmonic trajectories	54
4.2.2. Polyharmonic trajectories	
4.2.3. Almost periodic trajectories	56
4.2.4. Low-periodic trajectories	
4.2.5. Random trajectories	58
4.3. Period of the trajectory	59
4.3.1. Concept of period of the trajectory	59
4.3.2. Application of auto correlation function for testing of periodicity	
of the trajectory	60
4.4. Classification of trajectory shape	64
4.4.1. Concept of similarity of trajectory shape	64
4.4.2. The method of classification of trajectory shape	66
4.4.3. Pattern trajectories	66
4.4.4. Cross correlation function of the trajectory	67
4.4.5. Interpretation of cross correlation function of the trajectory	71
4.5. Analysis of trajectories in frequency domain	73
4.5.1. The assume procedure of analysis of trajectories in frequency domain	73
4.5.2. Fourier transformation of complex signals	75
4.5.3. Geometrical interpretation of spectrum of complex signal	77
4.5.4. Power spectral density	79
4.5.5. The estimation of power spectral density by means of numerical technics	81
4.5.6. Assumed model of trajectory in frequency domain	83
4.6. Hand of rotation of the point on trajectory	85
5 EXAMPLES OF ANALYSIS	87
5.1. Impute data	
5.2. Example of signals analysis recorded during the preload	88
5.3 Example of signals analysis recorded during rubs	92
5.4 Example of signals analysis recorded during the resonance	96
6. APPLICATION OF DETERMINED CHARACTERISTICS OF TRAJECTORY	98
6.1. Application of results of correlation analysis	98
6.1.1. Evaluation of the trajectory periodicity	98
6.1.2. Application of evaluation of trajectories shapes similarity	100
6.2. Application of frequency analysis results	101
6.2.1. Harmonics components of the trajectory	101

6.2.2. The estimation of the trajectory harmonics components characteristics by the	
use of trajectory spectrum1	103
6.2.3. Application of trajectory spectrum to definition diagnostics relationships 1	105
7. ENDING NOTICES AND CONCLUSIONS	109
7.1. Obtain results	109
7.2. Conclusions 1	110
7.3. Plan of feature investigations 1	115
APPENDIX A Digitise of two dimensional signal	119
APPENDIX B Algorithm of estimation of the trajectory period	122
APPENDIX C Algorithm of identification of the trajectory shape	124
APPENDIX D Time-window of data	127
APPENDIX E Errors in estimation of power spectral density of complex signal	131
APPENDIX F Estimation algorithm of the power spectral density	133
APPENDIX G Criteria of rotating machinery assessment condition	
on the basis of relative shaft vibration	135
22. A.A.A. Cross correlation function of the enjection static in the correlation function of the static sta	1.42
KEFERENCES	145
SUMMARIES	148

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень важнейших обозначений14
1. Введение
1.1. Диагностика турбомашин17
1.2. Причины колебаний роторов18
1.3. Наблюдение колебаний роторов
1.4. Применение сигналов радиусных относительных перемещений
шипа в диагностике турбомашин
1.5. Базы диагностических данных консультативных систем
1.6. Цель и тезисы
2. Относительные колебания валов
2.1. Время
2.2. Траектория перемещений шипа
2.3. Относительная траектория, центральная траектория
2.4. Порядок траекторий
2.5. Техники измереня раднусных относительных перемещений валов33
2.5.1. Бесконтактные датчики
2.5.2. Локализациа и монтаж бесконтактных датчиков
2.6. Постоянная и переменная составляющие сигнала радиусных
относительных перемещений
2.7. Оценка точности измерения относительных перемещений
2.7.1. Источники измерительных отклонений
2.7.2. Ограничение влияния состояния поверхности вала на
результаты измерений
2.8. Сопутствующие измерения
2.8.1. Идентификация выделенного углового положения
вала ротора
2.8.2. Идентификация выделенных угловых положений
вала ротора
2.8.3. Измерение скорости вращения ротора
3. Основные характеристики траекторий
3.1. Характеристики сигналов42
3.2. Анализы составных сигналов

3 3 2 Чисповые характеристики
3 3 3 Метолы частотного анализа траекторий, применяемые в
настоящее время
3.4. Основные характеристики нецентральных траекторий
3.5. Синхронное усреднение
4. Характеристики центральных траекторий
4.1. Введение
4.2. Виды траекторий
4.2.1. Гармонические траектории
4.2.2. Полигармонические траектории
4.2.3. Траектории почти периодические
4.2.4. Траектории слабо периодические
4.2.5. Случайные траектории
4.3. Период траекторий
4.3.1. Понятие периода периодической траектории
4.3.2. Применение функции автокорреляции дла исследования
периодичности центральной траектории
4.4. Классификация формы траектории
4.4.1. Понятие вероятности формы траектории
4.4.2. Метод классификации формы центральных траекторий66
4.4.3. Образцовые траектории
4.4.4. Функция взаимной корреляции траекторий
4.4.5. Интерпретация функции взаимной корреляции траекторий71
4.5. Анализ траекторий в области частоты73
4.5.1. Принятый способ анализа траекторий в области частоты73
4.5.2. Трансформация Фурьера комплексного сигнала75
4.5.3. Геометрическая интерпретация спектра комплексного сигнала77
4.5.4. Спектрльная плотность
4.5.5. Оценка спектрльной плотности цифровой техникой
4.5.6. Модель траектории принятая в области частоты
4.6. Поворот направления оброта пункта на траектории
5. Примеры анализов
5.1. Входные данные
5.2. Примеры результатов анализов сигналов зарегистрированных
в режиме перегрузк
5.3. Примеры результатов анализов сигналов зарегистрированных
в режиме прихватывания
5.4. Примеры результатов анализов сигналов зарегистрированных
в режиме резонанса

6. Применение определяемых характеристик траекторий	98
6.1. Применение результатов анализов	98
6.1.1. Оценка периодичности траекторий	98
6.1.2. Применение оценок вероятности двух траекторий	100
6.2. Применение результатов частотного анализа	101
6.2.1. Гармонические составляющие траекторий	101
6.2.2. Определение характеристик гармонических составляющих	
траекторий на основе спектров траекторий	103
6.2.3. Применение спектров траекторий для записи диагностичеся	ких
соотношений	105
7. Подведение итогов и вывоы	109
7.1. Полученные результаты	109
7.2. Выводы	110
7.3. План дальнейших исследований	115
Приложение	
А. Лискретизация двухмерного сигнала	
Б. Алгортм определения траекторий периода	
В. Алгоритм илентификани формы траектории	124
Г. Окна времени ланых	
Л. Погрешности оценки спектральной плотности	
комплексиого сигнала	131
Е. Алгоритм определения спектральной плотности	133
tozistudu zestennej josowej	
Литература	143
Резюме	148

Wykaz ważniejszych oznaczeń

$A_{zz}(f)$	- zastępcze widmo amplitudowe
Bw	 efektywna szerokość szumowa zastosowanego okna widmowego, wyrażona w [Hz]
$C(n;\alpha)$	- kwantyl rozkładu χ^2 o <i>n</i> stopniach swobody i poziomie istotności równym α ;
E{x}	- wartość oczekiwana sygnału x
f	- częstotliwość
fik	- częstotliwość k-tej składowej widma dyskretnego
ſn	- częstotliwość obrotów wału
fs	- częstotliwość próbkowania sygnału
ÍN	- częstotliwość Nyquista
Gxx()	- funkcja jednostronnej gęstości widmowej sygnału x
Im	- część urojona liczby zespolonej
j	- wskaźnik, $\sqrt{-1}$
k	- liczba całkowita, numer dyskretnej częstotliwości
m	 liczba "prążków" gęstości widmowej, uśrednianych podczas wygładzania częstotliwościowego
n	 liczba całkowita, numer próbki sygnału dyskretnego, liczba stopni swobody rozkładu zmiennej losowej
N	- liczba naturalna, liczba par wartości chwilowych sygnału
Re	- część rzeczywista liczby zespolonej
$R_{zz}(\tau)$	- funkcja autokorelacji zmiennej zespolonej z, będąca funkcją czasu opóźnienia τ
r=(.)	- znormalizowana funkcja autokorelacji
R _{mz} (U)	- funkcja korelacji zmiennych zespolonych $m(\varphi)$ i $z(\varphi)$, będąca funkcją opóźnienia drogi kątowej υ
r _{mz} (.)	- znormalizowana funkcja korelacji wzajemnej
Sxx(1)	- funkcja dwustronnej gęstości widmowej sygnału x
t	- czas "mikro"
<i>l</i> n	- n-ta dyskretna chwila czasu t
Т	 długość odcinka czasu "mikro", czas obserwacji realizacji sygnału, szerokość okna w dziedzinie czasu, okres
uT	- funkcja okna sygnału (danych) w dziedzinie czasu

 funkcja okna sygnału (danych) w dziedzinie częstotliwości $U_{\rm T}(f)$ - funkcja okna sygnału (danych) w dziedzinie czasu, o czasie trwania T WT - zbiór dyskretnych wartości liczbowych funkcji okna sygnału WT[n] x(t), y(t)- sygnaly rzeczywiste - transformacja Fouriera sygnału rzeczywistego x(t) X(f) $x(t,f,\Delta f)$ - cześć sygnału x(t) leżąca w paśmie czestotliwości o szerokości Δf położonym wokół częstotliwości f x[n], y[n] - sygnał dyskretny rzeczywisty $\{x_n\}, \{y_n\}$ - ciag liczb rzeczywistych s(.) - funkcja dwuwymiarowa, sygnał dwuwymiarowy z(.), m(.)- funkcje zespolone zmiennej rzeczywistej ZA - transformacja Fouriera sygnału z(t), widmo ciągłe sygnału $z(t,f,\Delta f)$ - część sygnału z(t) leżąca w paśmie częstotliwości o szerokości Δf położonym wokół częstotliwości f s -ta realizacja zespolonego sygnału dyskretnego z ZS - wynik przekształcenia zs[n] z zastosowaniem algorytmu FFT $Z_{S}[m]$ - zespolony sygnał dyskretny, dwuwymiarowy sygnał dyskretny z[n]- ciag liczb zespolonych $\{z_n\}$ ZIFI ciąg wyrazów otrzymanych w wyniku transformacji Fouriera, okresowego sygnału zespolonego z(t)Zk - ciąg wyrazów otrzymanych w wyniku dyskretnej transformacji Fouriera ciągu z_n $z_{\alpha}(t)$ - realizacja zespolonej funkcji losowej z(t) - wynik skończonego przekształcenia Fouriera realizacji sygnału losowego $Z_{\alpha}(f,T)$ obserwowanego w przedziale czasu o długości T α - kat obrotu ß - argument funkcji autokorelacji zmjennej zespolonej, kat obrotu figury na płaszczyźnie Γ - zbiór indeksów Δf rozdzielczość częstotliwościowa analizy, szerokość przedziału częstotliwości Δt - okres próbkowania - względne odchylenie standardowe 3 υ opóźnienie drogi katowej θ - czas "makro" σ - odchylenie standardowe estymatora - 15 -

-	anáznienie czesu t
	- Opozinene ozasu i
φ	 droga kątowa wału
Φ	- długość odcinka drogi kątowej, faza początkowa składowej widma
ω	- prędkość kątowa wału, częstość składowej widma
ω _k	- częstość kątowa k-tej składowej widma
{}	- nawiasy stosowane do zapisu zbioru
[]	- nawiasy zawierające listę wskaźników
11	- wartość bezwzględna, moduł liczby zespolonej
~	 symbol oznaczający, że wielkość, nad którą występuje, jest oceną zgrubną lub przybliżoną
^	 symbol oznaczający, że wielkość, nad którą występuje, jest wygładzoną oceną (estymatorem)
<i>x</i> (<i>t</i>)	- funkcja ciągłego argumentu t, określona dla dowolnych argumentów t
x[1]	 funkcja dyskretnego argumentu <i>t</i>, określona dla dyskretnych wartości <i>t</i>, element macierzy
druk p	oochyły - oznaczenie funkcji, zmiennej lub stałej

druk prosty - oznaczenie funkcji specjalnej lub operatora

1. WSTĘP

1.1. Diagnostyka maszyn wirnikowych

Diagnostyka techniczna maszyn zajmuje się oceną stanu obiektów mechanicznych przez bezpośrednie badanie ich własności i pośrednie badanie procesów towarzyszących działaniu tych urządzeń, tzw. procesów resztkowych [22]. Głównymi zadaniami diagnostyki technicznej maszyn są:

- określanie bieżącego stanu technicznego;
- wykrycie przyczyn zaistnienia obecnego stanu;
- określenie prognozy zmiany stanu.

Przesłanki do obiektywnej oceny stanu maszyny dają:

- informacje o konstrukcji maszyny;
- dane określające warunki działania obiektu;
- wyniki pomiarów dostępnych do obserwacji symptomów stanu technicznego;
- historia dotychczasowej eksploatacji maszyny.

Jako symptomy można wykorzystywać odchylenia od oczekiwanych charakterystyk roboczych maszyny. W przypadku maszyn wirnikowych są to [75] np.: prędkość obrotowa wirnika, sprawność, moment obrotowy, pobór energii elektrycznej i mocy, a także parametry "procesowe", jak: ciśnienia, temperatury i natężenia przepływu medium na wejściu i wyjściu. Ten rodzaj diagnostyki wymaga najczęściej okresowego wyłączania maszyny z ruchu i poddawania jej określonej sekwencji specjalnych badań testowych.

Innym rodzajem badań diagnostycznych są pomiary parametrów będących bezpośrednimi skutkami działania obiektu. Mowa tu np. o badaniach odchyłek kształtu i wymiarów będących skutkami procesów zużycia i porównywania ich ze wzorcem maszyny sprawnej. W przypadku turbozespołów jest to np. pomiar luzów w łożyskach [65]. Ten rodzaj badań może być przeprowadzony podczas okresowych remontów, gdyż wyznaczenie wymiarów odchyłek wymaga demontażu maszyny.

Stan techniczny układu może zostać zidentyfikowany ze znaczną pewnością w wyniku obserwacji tzw. procesów resztkowych, które w sposób niezamierzony, ale nieodłączny, towarzyszą funkcjonowaniu maszyn. Są to procesy termiczne, elektryczne i wibroakustyczne, takie jak: drgania, hałas, pulsacje. Wykorzystanie wyników obserwacji tych procesów w diagnostyce umożliwia ocenę stanu maszyny bez potrzeby wyłączania jej z ruchu i demontażu.

Cechy opisujące procesy resztkowe są symptomami stanu technicznego. Dla turbozespołów są to np.: wartości oraz zmiany wartości temperatury warstwy białego metalu w łożyskach

poprzecznych i wzdłużnych, temperatura oleju i korpusu maszyny wirnikowej (oraz różnice temperatury między różnymi częściami korpusu), temperatura uzwojeń stojana generatora, wydłużenia termiczne wału względem korpusu.

Spośród obserwowanych procesów resztkowych największe znaczenie jako nośniki informacji o stanie maszyny mają zjawiska wibroakustyczne, ponieważ [21]:

- są skutkiem większości procesów fizycznych, od których zależy prawidłowe funkcjonowanie maszyny;
- cechują się dużą szybkością przekazywania informacji;
- dostępność sygnałów wibroakustycznych umożliwia wykonanie szybkich, pośrednich badań stanu maszyny w naturalnych warunkach eksploatacji.

Zjawiska wibroakustyczne mogą być obserwowane za pomocą efektu akustycznego (hałasu) oraz drgań mechanicznych. Efekt akustyczny nie jest obecnie w dostatecznym stopniu stosowany w celach diagnostycznych [45].

Maszyna w czasie działania rozpatrywana może być jako generator procesów wibroakustycznych [55]. Przyczyną powstawania tych procesów jest ruch jej elementów, a w przypadku maszyn przepływowych również przepływ czynnika roboczego. Ruchy te przez oddziaływania siłowe, wynikające z konstrukcji maszyny, pobudzają do drgań jej korpus i strukturę wsporczą.

Symptomy stanu technicznego wyznaczane są na podstawie obserwacji sygnałów diagnostycznych, będących przebiegami mierzonych wielkości fizycznych. Podczas badań wibroakustycznych maszyny wirnikowej istnieje możliwość obserwacji sygnałów przemieszczeń względnych oraz bezwzględnych, prędkości lub przyśpieszeń drgań jej elementów, głównie: wirnika, korpusu i fundamentu.

Ze względu na cel badań turbozespół można obserwować w nominalnych (ustalonych) lub przejściowych warunkach działania [35, 58]. Przez nominalne warunki działania rozumie się określoną stałą prędkość obrotową, obciążenie, stabilność temperatury wszystkich zespołów itp. Badania prowadzone w warunkach przejściowych umożliwiają obserwację odpowiedzi maszyny na różne, często niestacjonarne oddziaływania zewnętrzne i/lub wewnętrzne. Przejściowe warunki działania to przede wszystkim działanie maszyny w warunkach rozruchu i wybiegu, a także odpowiedź wywołana przez skokową zmianę jakiegoś czynnika, np. obciążenia.

1.2. Przyczyny drgań wirników

Przyczyną powstawania drgań w przepływowych maszynach wimikowych są głównie niesprawności wimika [22, 55]. Najczęściej są to niewyrównoważenia konstrukcyjne, termiczne, eksploatacyjne oraz wygięcia lub anizotropia sztywności walu. Deformacje korpusu i rużycie łożysk mogą doprowadzić do wygięcia wimika, przesunięcia osiowego, powstawania niewspółosiowości odcinków wirników połączonych sprzęgłami lub ocierania wirnika o uszczelnienia i korpus. W maszynie przepływowej (np. turbinie) dodatkową przyczyną drgań wirnika może być rezonans pakietu łopatek, a w przypadku generatora efekt szczelinowy, spowodowany asymetrią pola magnetycznego.

Wirniki dużych maszyn przepływowych posadawiane są najczęściej w łożyskach hydrodynamicznych. Niesprawnościami tych łożysk są głównie drgania olejowe (wir olejowy, histerezowy, cierny i rezonansowy)[50]. Dodatkowo wadliwie wykonane lub zamocowane sprzęgła są źródłem oddziaływań siłowych z powodu niewspółosiowości i niewy-równoważenia. 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. Luzy pomiędzy podporami łożyskowymi i ich posadowieniem oraz niesymetryczne naciągi śrub fundamentowych mogą również być źródłem drgań układu.

W maszynach przepływowych wirnik i korpus są dodatkowo pobudzane do drgań ruchem medium roboczego. Drgania te objawiają się szczególnie wyraźnie jako skutki niesymetrii osiowej układu przepływowego (wywołanej np. zużyciem lub uszkodzeniem elementów układu łopatkowego).

Z wymienionych przyczyn drgań maszyny wirnikowej wynika, że wibroakustyczne badania diagnostyczne można prowadzić z wykorzystaniem wyników obserwacji [22]:

- średnich położeń czopów wirnika względem panewek łożysk;
- 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 kanałów w diagnostyce decyduje konstrukcja maszyny i sposób generowania zjawisk wibroakustycznych w tej maszynie oraz założony cel badań.

Z badań opisywanych w literaturze [63,69] wynika, że większość potencjalnych uszkodzeń i niesprawności maszyny wirnikowej to uszkodzenia wirnika i węzłów łożyskowych. Powyższe rozważania upoważniają do stwierdzenia, że najwięcej informacji o stanie maszyny wirnikowej niosą ze sobą drgania jej wirnika.

1.3. Obserwacja drgań wirników

Ze względu na kierunek ruchu drgającego (względem osi obrotu wirnika) rozróżnia się drgania wirnika: skrętne, wzdłużne (osiowe), poprzeczne i giętne [40, 72].

Pomiar drgań skrętnych wirników przysparza dużych trudności i wymaga odpowiedniego przygotowania obiektu do badań [55]. Do ich pomiaru stosuje się np. układy dwóch czujników przyśpieszeń drgań, układy tensometryczne lub dające najlepsze rezultaty układy cyfrowego pomiaru chwilowej prędkości obrotowej za pomocą czujników dostarczających dużej liczby impulsów na jeden obrót wału. W ustalonych warunkach pracy turbozespołu zmienność momentu obrotowego jest zazwyczaj mała, tak że drgania skrętne zwykle nie stanowią problemu w eksploatacji. Turbozespoły eksploatowane w kraju nie są wyposażane w układy do pomiaru drgań skrętnych. Wiadomo, że wpływ drgań skrętnych rośnie wraz ze wzrostem mocy turbozespołów. Brak jest wyczerpujących informacji o wynikach badań drgań skrętnych.

Pomiary drgań wirnika w kierunku osiowym zwykle nie są prowadzone. Stosowane czasami układy pomiaru drgań w łożyskach oporowych dostarczają sygnałów pozwalających ocenić stan łożyska i nie są stosowane do wnioskowania o drganiach wzdłużnych wirnika. Powszechnie stosowane są układy nadzoru średniego położenia wału względem korpusu w kierunku osiowym, z wykorzystaniem czujników bezstykowych [19, 8]. Obserwowane, w dłuższych odcinkach czasu, zmiany pozwalają ocenić zużycie łożyska oporowego oraz wydłużenia cieplne wirnika i korpusu.

Często prowadzony jest natomiast pomiar bezwzględnych drgań podpór łożyskowych w kierunku osiowym dwoma czujnikami o osiach zawartych w płaszczyźnie poziomej [54]. Tak obserwowane drgania podpór w kierunku osiowym w większości przypadków nie są skutkiem drgań osiowych wałów. Najczęściej niosą one informację o niewłaściwym sposobie osiowania zespołu lub możliwym wygięciu wału. Dla maszyn z wirnikami elastycznymi drgania te są dodatkowo uwarunkowane postacią drgań giętnych wału.

Drgania poprzeczne i giętne wału obserwowane są w płaszczyznach prostopadłych do osi wirnika (promieniowych). Podczas pomiaru drgań wału w wybranych płaszczyznach promieniowych obserwowany jest ruch wału będący jednocześnie wynikiem drgań poprzecznych i giętnych.

Bezpośredni pomiar bezwzględnych drgań wału w płaszczyźnie promieniowej może być realizowany za pomocą sondy dualnej [12, 97]. W maszynach wirnikowych eksploatowanych w Polsce układy takie występują rzadko. Mierzone są natomiast drgania wału względem panewki lub oprawy łożyska, z wykorzystaniem bezstykowych przetworników drgań wału oraz bezwzględne drgania elementów maszyny bezpośrednio z wałem współpracujących, czyli panewek łożysk lub podpór łożyskowych [9]. Decyzja, gdzie i jak mierzyć drgania wirnika, jest zależna przede wszystkim od konstrukcji samej maszyny. Wyjaśnia to zasada zaczerpnięta z pracy [22] :

- Jeżeli masa korpusu jest duża w porównaniu z masą wirnika, czyli sztywność korpusu jest znaczna oraz maszyna posiada łożyska ślizgowe, których podatność jest bardzo duża, drgania generowane przez wirnik są niemal całkowicie dyssypowane w podatnym łożyskowaniu. Tam też należy zainstalować bezstykowy przetwornik drgań wału względem korpusu lub panewki łożyska.
- Jeżeli wirnik posiada porównywalną masę z korpusem, energia drgań generowanych przez wirnik jest dyssypowana przez drgania obudowy łożyska, korpus lub nawet fundament. Wtedy przetwornik drgań bezwzględnych należy instalować na obudowie 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 układzie odniesienia nieruchomym i niezależnym od drgań innych elementów badanej maszyny.
- Przy pomiarze przemieszczeń względnych wirnika punktem odniesienia czujnika jest jego obudowa, najczęściej sztywno przymocowana do obudowy łożyska lub korpusu maszyny. Podczas pomiaru korpus maszyny lub obudowa łożyska wykonują ruch drgający. Mierzone przemieszczenia wirnika są obserwowane w ruchomym układzie współrzędnych, którego punktem odniesienia jest obudowa czujnika.

Obecnie turbozespoły w kraju coraz częściej wyposażane są w układy do pomiaru drgań względnych wałów [44, 66]. Do pomiaru stosowane są bezstykowe przetworniki wykorzystujące prądy wirowe, a obserwowaną wielkością są przemieszczenia drgań [9]. Głównym celem pomiaru jest obserwacja promieniowych przemieszczeń czopa wału w łożysku. Ze względu na trudności związane z zainstalowaniem przetworników bezpośrednio w łożyskach instalowane są one najczęściej w ich pobliżu.

Przetworniki przemieszczeń względnych pozwalają na pomiar chwilowej odległości między czołem czujnika i powierzchnią wału. Obserwacja składowej stałej sygnału informuje o położeniu osi wału względem elementu, do którego przymocowany jest czujnik. Składowa zmienna sygnału informuje o chwilowych zmianach tego położenia, czyli o drganiach wału (a dokładnie osi wału) w płaszczyźnie, w której zamocowano czujnik.

Głównymi wadami pomiaru przemieszczeń względnych są [97]:

- Konieczność bezpośredniego dostępu czujnika do powierzchni czopa wału, co wymaga najczęściej pewnej ingerencji w konstrukcję maszyny. Powoduje to, że pomiar przemieszczeń względnych prowadzony jest zwykle przez układy stacjonarne.
- Niekorzystny wpływ na wyniki pomiaru stanu powierzchni wału współpracującej z czujnikiem, która może być źródłem zniekształceń sygnału i wymaga odpowiedniego przygotowania.

Obserwacja ruchu wału w kierunku promieniowym może być dokonywana pośrednio poprzez pomiar drgań obsady łożysk lub korpusu (w przypadku konstrukcyjnego połączenia tych elementów). Jeszcze kilka lat temu, głównie ze względu na koszty, był to, z nielicznymi wyjątkami, jedyny powszechnie stosowany sposób obserwacji drgań wałów maszyn wirnikowych. Jako przetworniki stosuje się najczęściej akcelerometry, które w połączeniu z układami całkującymi umożliwiają obserwację sygnałów przyśpieszeń, prędkości lub przemieszczeń drgań [77]. Pomiar drgań bezwzględnych jest łatwy do realizacji ze względu na możliwość szybkiego i prostego montażu czujników na obudowach łożysk lub korpusach maszyn. Wymagana jest jedynie niewielka powierzchnia płaska do przytwierdzenia przetwornika.

Stosowane są również czujniki elektrodynamiczne [41]. Dostarczają one sygnałów proporcjonalnych do prędkości drgań korpusu łożyska. Charakteryzują się znacznie większą od akcelerometrów masą i wymiarami. Często jest to zaletą ze względu na wymagania stawiane przez służby remontowe, ponieważ duże wymiary czujnika ułatwiają jego montaż.

Pomiar drgań bezwzględnych obarczony jest dużymi ograniczeniami. Wynika to bezpośrednio z istnienia funkcji przejścia od źródła generowanego sygnału drganiowego, jakim jest obracający się wał, do miejsca zamocowania przetwornika drgań na obudowie łożyska [23]. Zróżnicowanie funkcji przejścia wynika z:

- impedancji mechanicznej elementów;
- opóźnienia fazowego sygnału;
- rezonansów strukturalnych;
- występowania klina olejowego w łożyskach, charakteryzującego się dużą nieliniowością.

Możliwe zmiany obciążenia maszyny i jej stanu technicznego w funkcji czasu "makro" powodują, że funkcja przejścia może zmieniać się w czasie "makro", co utrudnia proces wnioskowania diagnostycznego.

Obecnie w coraz powszechniej stosowanych układach nadzoru drganiowego maszyn wirnikowych [8, 19, 44] obserwacja drgań promieniowych wału jest prowadzona z jednoczesnym wykorzystaniem układów czujników przemieszczeń względnych i czujników do pomiaru drgań bezwzględnych instalowanych na obudowach łożysk. Wielu autorów [18, 20] uważa, że pomiar drgań względnych wału daje możliwość wczesnej identyfikacji większości niesprawności układu wirnika i łożysk. Z drugiej strony znane są przypadki takich uszkodzeń turbozespołów (np. pęknięcia wałów), których wczesne rozpoznanie jedynie za pomocą przemieszczeń względnych jest trudne i było często niemożliwe [63]. Podsumowując, można stwierdzić, że pomiary drgań względnych wału i drgań bezwzględnych obudów łożysk w kierunku promieniowym są wzajemnie uzupełniającymi się, ważnymi sposobami obserwacji drgań maszyn wirnikowych.

1.4. Zastosowanie sygnałów promieniowych przemieszczeń względnych czopa w diagnostyce maszyn wirnikowych

W rozdziale omówione zostaną badania stanu maszyn wirnikowych, prowadzone na podstawie przemieszczeń wału względem panewki łożyska, mierzonych w kierunku promieniowym.

Obserwacja promieniowych przemieszczeń względnych wału dostarcza ważnych danych o stanie technicznym i warunkach działania maszyny wirnikowej. Dane te zawierają informacje wykorzystywane w układach nadzorujących turbozespoły, a także stosowane do diagnozowania ich stanu. W literaturze [60, 64] opisywane są typowe relacje diagnostyczne między stanem technicznym maszyny wirnikowej (jej niesprawnościami) a symptomami tego stanu, będącymi cechami sygnałów przemieszczeń względnych. Znane są relacje umożliwiające rozpoznawanie typowych niesprawności maszyn wirnikowych, takich jak:

- nadmierne niewyrównoważenie;
- niestabilności działania łożysk ślizgowych;
- nadmierne przeciążenie;
- ocieranie części zespołu wirującego;
- pęknięcie wału wirnika itp.

W badaniach [15] wykorzystywana jest zarówno składowa zmienna, jak i stała sygnału przemieszczeń względnych. Na podstawie składowych stałych sygnałów, z uwzględnieniem początkowego położenia czujników względem wału, wyznaczane jest średnie położenie środka czopa. Daje ono ocenę położenia wału względem obszaru określonego przez luz łożyska [14].

Prowadzenie obserwacji drgań jednym czujnikiem przemieszczeń względnych dostarcza informacji o drganiach czopa w kierunku odpowiadającym kierunkowi osi czujnika. Kryteria oceny wyników pomiarów drgań względnych w jednym kierunku najczęściej wymagają założenia, że kierunek pomiaru pokrywa się z kierunkiem maksymalnych amplitud drgań wału [1, 2, 3]. Kierunek ten trudno przewidzieć przed zainstalowaniem czujnika i może zmieniać się w czasie działania maszyny. Jest to przyczyna dużych niedokładności ocen formułowanych na ich podstawie.

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 [97], 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.

W badaniach diagnostycznych wykorzystywane są cechy sygnałów przemieszczeń względnych wału rozpatrywanych jako :

- sygnały jednowymiarowe uzyskane za pomocą jednego czujnika;
- sygnały dwuwymiarowe uzyskane za pomocą dwu jednocześnie działających czujników.

Wyznaczanie cech sygnałów jednowymiarowych w dziedzinie czasu i częstotliwości dokonywane jest z wykorzystaniem standardowych analizatorów sygnałów. Prowadzone są analizy w dziedzinie czasu i częstotliwości sygnałów. Wyznaczane są takie cechy, jak [40]:

- amplitudowe i bezwymiarowe cechy punktowe (np. wartości średnia, skuteczna, szczytowa lub międzyszczytowa);
- gęstości rozkładu amplitud sygnałów;
- funkcje korelacji i kowariancji;
- widma gęstości mocy;
- fazy wybranych składowych harmonicznych itp.

Stosowana w praktyce analiza sygnałów przemieszczeń względnych, opisujących trajektorię ruchu czopa, jako sygnałów dwuwymiarowych obejmuje wyłącznie:

- wyznaczanie jednej oceny punktowej sygnału (zdefiniowana w normie VDI 2059 [86]);
- kreślenie przebiegów czasowych sygnałów dwuwymiarowych w funkcji czasu na ekranie w postaci trajektorii i subiektywną ocenę ich cech takich, jak : okresowość, kształt, kierunek wirowania [15];
- obserwację (na ekranie) wybranych składowych częstotliwościowych sygnału dwuwymiarowego najczęściej o częstotliwości równej częstotliwości obrotów wirnika i kilku jej harmonicznych oraz subiektywną ocenę ich cech (analiza wymaga zastosowania zestawu odpowiedniego sprzętu (rozdz. 3.3.3))[47, 40].

Z powodu braku ogólnie przyjętych metod analizy sygnałów dwuwymiarowych wnioskowanie o stanie technicznym maszyny prowadzone jest głównie na podstawie analizy jednowymiarowych sygnałów składowych. Cechy sygnałów dwuwymiarowych oceniane są głównie na podstawie obserwacji przebiegów czasowych sygnału w postaci trajektorii (cechy trajektorii obecnie wyznaczane opisano w rozdz. 3.3). Uwzględniane są takie cechy trajektorii jak jej kształt, kierunek obrotu, okresowość oraz stabilność tych cech w czasie. Cech tych nie można otrzymać w wyniku analizy składowych sygnałów jednowymiarowych.

1.5. Bazy danych diagnostycznych systemów doradczych

Możliwości stworzone przez układy ciągłego nadzoru maszyn krytycznych pozwalają na ciągłe obserwowanie (i gromadzenie) dużej liczby wybranych parametrów roboczych i sygnałów wibroakustycznych, będących nośnikami informacji o stanie technicznym maszyny. W przypadku turbozespołów obserwowanych jest z reguły kilkaset sygnałów [8, 19, 36]. Obecnie prowadzone są prace nad wdrożeniem układów umożliwiających szczegółową analizę tak dużej ilości informacji w celu diagnozowania stanu technicznego badanej maszyny [68]. Spośród różnych programów wspomagających sposób wnioskowania w diagnostyce technicznej maszyn największe zastosowanie mają tzw. systemy doradcze. Obecnie najczęściej stosowane są systemy doradcze, w których zasadniczym sposobem prezentacji wiedzy są reguły [30, 32]. Systemy te składają się z następujących głównych elementów: bazy wiedzy (zawierającej zbiór reguł), bazy danych stałych i zmiennych, stosu zadań do wykonania, procedur wnioskowania, procedur sterowania dialogiem i procedur objaśniania.

Baza danych stałych zawiera informacje faktograficzne np. o strukturze obiektu i jego stanie. Baza danych zmiennych zawiera głównie wyniki pomiarów (cechy sygnałów diagnostycznych) oraz odpowiedzi użytkownika wprowadzane za pomocą procedur sterowania dialogiem i wyniki pośrednie (wnioski) [42].

Elementami baz danych są stwierdzenia [25] zapisywane na przykład w postaci następującej uporządkowanej trójki ((OBIEKT), (ATRYBUT), (WARTOŚĆ)). Jest ona interpretowana jako skrót zdania: obiektowi (OBIEKT) przysługuje cecha (ATRYBUT) o wartości (WARTOŚĆ). Przykładem stwierdzenia może być uporządkowana trójka ((Olej), (Temperatura), (67°C)).

Specyficznym zadaniem w diagnostyce maszyn jest potrzeba wyznaczania i zapisywania w bazach danych złożonych ocen dużej liczby sygnałów diagnostycznych [90]. Obserwowane sygnały można podzielić na :

- sygnały wolnozmienne, których wartość w danej chwili można opisać jedną liczbą (np. temperatura panewki łożyska);
- sygnały szybkozmienne, które można zapisać za pomocą funkcji (np. przebieg zmian wartości przyśpieszeń drgań obudowy łożyska).

Sygnały szybkozmienne są przetwarzane według różnych algorytmów w celu otrzymania ocen różnego typu cech sygnałów.

W celu umożliwienia stosowania relacji diagnostycznych między trajektorią ruchu środka czopa w łożysku ślizgowym a stanem technicznym maszyny wirnikowej konieczne jest wyznaczanie istotnych z punktu widzenia diagnostyki technicznej cech trajektorii. Część obecnie uwzględnianych cech trajektorii (np. wielkość, wartość okresu), będących liczbami, można bezpośrednio przyjąć jako wartości atrybutów stwierdzeń, np.: (Trajektoria 1234, Okres, 0.02[s]).

Wartości cech sygnałów najczęściej są liczbami. Ogólność pojęcia "cecha" w systemach doradczych nie wymaga przyjmowania jako wartości cech jedynie liczb. W przypadku wartości nie określonych bezpośrednio ilościowo (wartości jakościowych) przyjmowany jest kod umożliwiający zapisanie ich w postaci dyskretnej [24, 87].

W przypadku cech takich jak np. kształt trajektorii konieczne jest zdefiniowanie cechy i przyjęcie zbioru dopuszczalnych jej wartości (np. owalny, owalny z wewnętrzną pętlą, itp.). Celem takiego postępowania jest wyznaczenie takich cech trajektorii, obecnie ocenianych subiektywnie przez osobę prowadzącą badania, które posłużą do tworzenia stwierdzeń. Przykładem takiego stwierdzenia może być uporządkowana trójka (Trajektoria, Kształt, Owalny).

1.6. Cel i tezy pracy

Celem pracy było opracowanie metod wyznaczania wartości cech trajektorii ruchu środka czopa w łożysku i praktyczne sprawdzenie ich przydatności w diagnostyce technicznej maszyn wirnikowych. W tym celu konieczne były przedsięwzięcia takie, jak:

- formalizacja identyfikowanych cech trajektorii;
- opracowanie metod identyfikacji wprowadzonych cech trajektorii zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości z wykorzystaniem technik cyfrowych;
- opracowanie algorytmów i programów służących wyznaczaniu tych cech;
- przeprowadzenie badań weryfikacyjnych, obejmujących pomiary, rejestrację i analizę sygnałów;
- sprawdzenie przydatności wyznaczanych cech w przypadku analizy sygnałów zarejestrowanych dla typowych niesprawności maszyn wirnikowych;
- identyfikacja relacji diagnostycznych umożliwiających rozpoznawanie wybranych niesprawności maszyn wirnikowych, wykorzystujących cechy trajektorii.

Istnieją dwa powody, dla których podjęto pracę.

- Podczas realizacji prac prowadzonych w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej [74, 68], zmierzających do stworzenia systemu doradczego wspomagającego diagnozowanie turbozespołów, wyłonił się problem poszukiwania nowych oraz wykorzystania znanych relacji diagnostycznych między stanem maszyny a cechami trajektorii. Dla potrzeb takiego systemu wszystkie uwzględniane obecnie przez diagnostów cechy trajektorii, oceniane dotychczas subiektywnie na podstawie obserwacji trajektorii, należy sformalizować i wyznaczać automatycznie [89]. Na podstawie tych cech zostanie opracowana baza danych dla systemu doradczego, umożliwiająca rozpoznawanie wybranych niesprawności maszyn wirnikowych.
- Sygnał dwuwymiarowy opisujący trajektorię stanowi pełny opis ruchu czopa względem panewki łożyska. Zdaniem autora istnieje możliwość zdefiniowania nowych cech trajektorii, istotnych z punktu widzenia diagnostyki technicznej maszyn wirnikowych. Umożliwi to identyfikację relacji diagnostycznych między wybranymi niesprawnościami maszyny wirnikowej a wyznaczanymi cechami trajektorii.

W pracy do opisu i rozwiązania wielu zagadnień przyjęto zapis sygnału dwuwymiarowego opisującego trajektorię w postaci funkcji zespolonej. Chwilowe wartości sygnału dwuwymiarowego odpowiadają współrzędnym punktów w prostokątnym układzie współrzędnych. Wykorzystując istnienie wzajemnie jednoznacznej odpowiedniości między uporządkowanymi parami współrzędnych kartezjańskich punktów a liczbami zespolonymi, płaszczyznę, w której opisywana jest trajektoria, można rozpatrywać jako płaszczyznę zespoloną. Wówczas sygnał dwuwymiarowy można zapisać jako jednowymiarowy sygnał zespolony zmiennej rzeczywistej, gdzie część rzeczywista i część urojona są rzeczywistymi funkcjami czasu, będącymi sygnałami jednowymiarowymi zarejestrowanymi we wzajemnie prostopadłych kierunkach pomiarowych. Zespolona reprezentacja trajektorii, zastosowana w niniejszej pracy, ułatwi analizę formalną właściwości trajektorii i umożliwi sprawny opis wykonywanych przekształceń.

Ponieważ brak jest ogólnie przyjętych metod analizy sygnałów dwuwymiarowych opisujących trajektorie ruchu środka czopa względem panewki łożyska, istnieje potrzeba opracowania metod wyznaczania ocen ilościowych cech trajektorii, ocenianych dotychczas subiektywnie przez prowadzącego badania. Dodatkowo występuje potrzeba zdefiniowania nowych, istotnych z punktu widzenia diagnostyki technicznej, cech trajektorii oraz sprawdzenia ich przydatności w diagnostyce technicznej maszyn wirnikowych.

Badania podjęte przez autora stanowią kontynuację dotychczasowych prac naukowych prowadzonych w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn podczas realizacji pracy [97]. Część zadań objętych niniejszym opracowaniem wykonano podczas realizacji grantu promotorskiego nr rej. 7T07B01108 "Trajektoria ruchu środka czopa jako symptom stanu technicznego łożysk hydrodynamicznych", finansowanego przez KBN.

Tezy pracy:

- Zastosowanie zespolonej reprezentacji drgań względnych środka czopa w łożysku ślizgowym w płaszczyźnie promieniowej pozwala na ilościową ocenę drgań. Może ona zastępować oceny jakościowe dokonywane obecnie przez specjalistów na podstawie obserwacji wykresów przebiegów czasowych sygnałów, pokazywanych w postaci trajektorii.
- Zespolona reprezentacja drgań względnych czopa pozwala, między innymi, na wyznaczanie takich cech drgań, które trudno otrzymać na podstawie analizy sygnałów składowych.
- Istnieje możliwość ustalenia ograniczonego, mało licznego zbioru cech opisujących trajektorię, pozwalających na rejestrowanie w diagnostycznych bazach danych historii zmian trajektorii w funkcji czasu.

2. DRGANIA WZGLĘDNE WAŁÓW

Celem niniejszego rozdziału jest wprowadzenie formalnych definicji pojęć związanych z obserwowaniem drgań względnych wałów oraz zestawienie uwag i zaleceń dotyczących metod i technik pomiaru tych drgań.

2.1. Czas

Drgania wału obserwowane są w funkcji czasu. Zbiorem czasu może być dowolny zbiór liniowo uporządkowany. Elementy tego zbioru nazywane są chwilami czasu. Szczególnym przypadkiem zbioru czasu jest czas zegarowy (tzw. czas "rzeczywisty").

W diagnostyce maszyn celowe jest rozróżnianie dziedziny czasu, w której szacowane są "chwilowe" wartości cech sygnałów, oraz dziedziny, w której obserwowane są zmiany obiektu badań diagnostycznych [29]. Wynika to z faktu, że długości okresów czasu niezbędnych dla estymacji (wyznaczania) "chwilowych" wartości cech sygnału mierzone są najczęściej w ułamkach sekund, natomiast zmiany stanu technicznego maszyn zachodzą w znacznie dłuższych okresach czasu.

Czas "makro" θ ma przypisane znaczenie identyfikatora realizacji procesu stochastycznego [28]. Jest on również nazywany czasem "życia" obiektu [22]. Brak możliwości ciągłej obserwacji badanych wielkości jest przyczyną wyróżniania dyskretnego zbioru czasu "makro", definiowanego jako ciąg chwil czasu. Zakłada się, że czas "makro" θ przyjmuje jedną, stałą wartość dla wybranej realizacji.

Czas "mikro" *t* jest czasem procesu stochastycznego [28]. Nazywany jest on również czasem dynamicznym [22]. Określając chwile czasu "mikro" zakłada się najczęściej, że są one elementami odcinka czasu, w którym rozpatrywany proces może być uznany za stacjonarny.

W dalszej części pracy użycie pojęcia "czas", bez podania czy jest to czas "makro", czy "mikro", będzie oznaczało czas "mikro". Użycie czasu w znaczeniu "makro" będzie wyraźnie zaznaczane.

W diagnostyce maszyn wirnikowych najczęściej wykorzystywane są dwa zbiory czasu "mikro": czas zegarowy t oraz zbiór, którego elementami są chwilowe wartości drogi kątowej wału φ określane w radianach i mierzone od pewnego wyróżnionego położenia wału. Podczas działania maszyny wirnikowej droga kątowa czopa jest (najczęściej) monotonicznie rosnącą funkcją czasu zegarowego. Oznacza to, że dla wirującego wału czas zegarowy może być zapisany jako monotonicznie rosnąca funkcja drogi kątowej czopa $t(\varphi)$. Droga kątowa może być również zapisana jako monotonicznie rosnąca funkcja czasu zegarowego $\varphi(t)$. Należy

wyraźnie podkreślić, że chwilowe zmiany prędkości wirowania wału powodują, iż odwzorowania $t(\varphi)$ i $\varphi(t)$ nie są odwzorowaniami liniowymi.

Sygnały, opisujące zjawiska zachodzące w maszynach wirnikowych, często dogodnie jest rozpatrywać jako funkcje drogi kątowej wału. Uniezależnia to wynik opisu sygnału od chwilowej prędkości obrotowej maszyny. Część opisanych w pracy metod analizy sygnałów wymaga założenia, że sygnały są opisane jako funkcje drogi kątowej wału.

Uzyskanie sygnału jako funkcji drogi kątowej wału stwarza problemy techniczne i wymaga odpowiedniej adaptacji obiektu do badań. W warunkach technicznych wykorzystuje się najczęściej układy umożliwiające identyfikację N>>1 wyróżnionych położeń wału (rozdz. 2.8.2).

2.2. Trajektoria przemieszczeń czopa

Tor ruchu środka czopa w łożysku ślizgowym, obserwowany w płaszczyźnie promieniowej, tworzy krzywe płaskie. Obserwacja tego ruchu w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach odpowiada obserwacji ruch dwu rzutów środka czopa na osie prostokątnego układu współrzędnych.



Oscyloskop

- Rys. 2.1. Sposób obserwacji trajektorii ruchu środka czopa z wykorzystaniem pary czujników przemieszczeń względnych
- Fig. 2.1. The way of observation of the rotor shaft motion trajectory using two relative displacements transducers

Zastosowanie dwóch czujników przemieszczeń względnych o osiach wzajemnie prostopadłych, leżących w jednej płaszczyźnie prostopadłej do osi wału, umożliwia otrzymanie dwóch sygnałów x(t) i y(t) opisujących przemieszczenia wału we wzajemnie prostopadłych kierunkach (rys. 2.1). Przyjmując, że wał w miejscu współdziałania z czujnikami nie ma odchyłki okragłości oraz niejednorodności własności fizycznych powierzchni, można przyjąć, że sygnały te stanowią opis przemieszczeń punktu materialnego reprezentującego środek wału w płaszczyźnie promieniowej. Sygnały te opisują dwa rzuty tego ruchu na dwie osie prostokątnego układu współrzędnych.

W dalszej części pracy przyjęto, że sygnały x(t) i y(t) zarejestrowane jednocześnie w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach stanowią opis przemieszczeń środka wału w płaszczyźnie

promieniowej. Rejestrując te dwa sygnały jednocześnie (np. na dwu ścieżkach magnetofonu), każdej chwili czasu "mikro" t jednoznacznie przyporządkowana jest uporządkowana para wartości sygnałów x(t) i y(t). Para ta stanowi współrzędne punktu w prostokątnym układzie współrzędnych.

Miejsce geometryczne punktów na płaszczyźnie prostokątnego układu współrzędnych, których współrzędnymi są wartości chwilowe amplitud przemieszczeń drgań sygnałów x(t) i y(t), tworzy trajektorię ruchu środka czopa. Trajektoria przemieszczeń na płaszczyźnie prostokątnego układu współrzędnych jest krzywą ciągłą.

W dalszej części pracy przyjęto, że uporządkowana para sygnałów przemieszczeń x(t) i y(t) zarejestrowanych w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach na odcinku czasu o początku t_p i końcu t_k , zapisana w postaci :

$$s(t) = \langle x(t), y(t) \rangle \quad \text{dla } t \in (t_p, t_k), \qquad (2-1)$$

stanowi zapis trajektorii przemieszczeń. W następstwie tak rozszerzonego pojęcia trajektorii przemieszczeń sygnały r(t) i y(t) nazywane będą sygnałami składowymi trajektorii.

Tak zdefiniowana uporządkowana para sygnałów nazywana będzie również sygnałem dwuwymiarowym jednej zmiennej, a sygnały x(t) i y(t) nazywane będą składowymi sygnału dwuwymiarowego.

Jeżeli sygnały składowe zapisane są w postaci funkcji x[t] i y[t], których argument przyjmuje wartości dyskretne $t = t_1, t_2, ..., t_n$, np. są wynikiem jednoczesnego próbkowania na dwu kanałach przetwornika analogowo cyfrowego (dodatek A), zapis trajektorii przemieszczeń przyjmuje postać :

$$s[t] = \langle x[t], y[t] \rangle$$
 dla $t \in \{t_1, t_2, ..., t_n\}.$ (2-2)

Trajektoria przemieszczeń na płaszczyźnie prostokątnego układu współrzędnych tworzy ciąg punktów. Najczęściej kolejne punkty ciągu są łączone odcinkami prostej.

Przemieszczenia czopa mogą być mierzone względem bezwzględnego lub względnego układu odniesienia. Nazywane są wówczas przemieszczeniami bezwzględnymi (absolutnymi) lub przemieszczeniami względnymi.

2.3. Trajektoria względna, trajektoria centralna

Podczas pomiaru drgań bezwzględnych wielkość fizyczna jest obserwowana w układzie odniesienia nieruchomym i niezależnym od drgań badanej maszyny, praktycznie uznawanym za bezwzględny. Jeżeli sygnały x(t) i y(t) są sygnałami przemieszczeń bezwzględnych, analizowana trajektoria nazywana będzie trajektorią przemieszczeń bezwzględnych. Bezpośredni pomiar bezwzględnych drgań wału w płaszczyźnie promieniowej może być realizowany za pomocą sondy dualnej. W maszynach wirnikowych eksploatowanych w Polsce

układy takie nie są stosowane. W pracy nie są rozpatrywane trajektorie przemieszczeń bezwzględnych.

W przypadku pomiaru przemieszczeń względnych wirnika punktem odniesienia czujnika jest jego obudowa, najczęściej sztywno przymocowana do obudowy łożyska lub korpusu maszyny. Korpus maszyny lub obudowa łożyska wykonują wtedy ruch drgający, co powoduje, że mierzone przemieszczenia wirnika są obserwowane w ruchomym układzie współrzędnych. Jeżeli sygnały x(t) i y(t) są sygnałami względnymi, analizowana trajektoria nazywana będzie trajektorią przemieszczeń względnych.

Obecnie turbozespoły coraz częściej wyposażane są w układy do pomiaru drgań względnych wałów [44, 66]. Do pomiaru stosowane są przetworniki bezkontaktowe, wykorzystujące prądy wirowe, a obserwowaną wielkością są przemieszczenia drgań.

Często, dla wybranych potrzeb, analizuje się jedynie składową zmienną sygnału, czyli odchylenia od wartości średniej sygnałów przemieszczeń względnych. W tym celu podczas przetwarzania wstępnego wyznaczana jest wartość średnia sygnału i odejmowana od wartości chwilowych sygnału. Gdy x(t) i y(t) są ciągłymi i stacjonarnymi funkcjami czasu, ich wartości średnie określone są jako :

$$\overline{x} = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(t) dt.$$
(2-3)

W praktyce analizowane są sygnały zarejestrowane na skończonym odcinku czasu. Gdy x(t) i y(t) są analizowane na odcinku czasu o długości T, ich wartości średnie są określone jako:

$$\overline{x} = \frac{1}{T} \int_{ta}^{ta+T} x(t) dt, \qquad (2-4)$$

gdzie t_a określa chwilę czasu, w której rozpoczęto analizę sygnału. Długości odcinka czasu T należy dobrać tak, aby wartość średnia sygnału była stała w funkcji czasu "mikro".

Przyjęcie nowego układu współrzędnych, którego środek pokrywa się ze średnimi wartościami sygnałów przemieszczeń, odpowiada zmianie układu odniesienia, polegającej na przyjęciu ruchomego układu odniesienia związanego ze średnim położeniem środka wału. Trajektoria analizowana w tak przyjętym układzie współrzędnych nazywana będzie względną lub bezwzględną trajektorią centralną (w odróżnieniu od trajektorii niecentralnej).

2.4. Rząd trajektorii

W pracy przyjęto, że sygnały zarejestrowane jednocześnie w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach stanowią opis przemieszczeń punktu materialnego reprezentującego środek wału w płaszczyźnie promieniowej. Tor ruchu środka czopa obserwowany w płaszczyźnie promieniowej tworzy krzywe płaskie, nazwane trajektoriami przemieszczeń.

Przyjęta interpretacja trajektorii jako obrazu przemieszczeń punktu materialnego pozwala na wyznaczenie pierwszej, drugiej i wyższych pochodnych tych przemieszczeń względem czasu. Pochodne te będą miały znaczenie prędkości, przyśpieszeń itd. punktu materialnego. Wykresy tak wyznaczanych przebiegów wielkości wektorowych (sprowadzonych do jednego punktu) nazywane są w kinematyce hodografami prędkości, przyśpieszenia itp.



- Rys. 2.2. Przykłady trajektorii ruchu środka czopa w łożysku i odpowiadające im hodografy prędkości
- Fig. 2.2. Examples of trajectories of rotor shaft motion in the bearing and their velocity hodographs

Hodografy obserwowane na płaszczyźnie tworzą krzywe. W dalszej części pracy hodografy kolejnych pochodnych przemieszczeń będą nazywane trajektoriami drugiego, trzeciego i wyższych rzędów. Analogicznie, trajektoria przemieszczeń może być nazywana trajektorią pierwszego rzędu.

Na rys. 2.2 przedstawiono dwie trajektorie o identycznym kształcie. Na wykresach zaznaczono punkty zarejestrowane w równych odstępach czasu. Istnieje wyraźna różnica między przebiegami w funkcji czasu sygnałów opisujących trajektorię, która przejawia się w różnicy rozmieszczenia punktów na krzywych.

Z analizy trajektorii A wynika, że punkt materialny obrazujący środek czopa w równych odstępach czasu przemieszcza się o odcinki o mniej więcej jednakowej długości, co oznacza, że jego prędkość liniowa zmienia się w niewielkim zakresie. Natomiast w przypadku trajektorii B punkt materialny w równych odstępach czasu przemierza odcinki drogi o szybko zmieniającej się długości, co oznacza, że jego prędkość liniowa i przyśpieszenie zmienia się w dużym zakresie. Powoduje to, że hodografy prędkości i przyśpieszenia otrzymane w wyniku analiz obydwu trajektorii znacznie się róźnią (rys. 2.2).

Informacje o wartościach i charakterze zmian prędkości i przyśpieszenia, z jakim porusza się środek wału, mogą stanowić ważne informacje diagnostyczne. Oznacza to, że analiza cech trajektorii drugiego i trzeciego rzędu, szczególnie w dziedzinie czasu, może dostarczać informacji diagnostycznych, dogodnych do interpretacji.

W dalszych częściach niniejszej pracy ogólna nazwa "trajektoria" stosowana będzie jedynie w przypadku trajektorii pierwszego rzędu, obserwowanej we względnym układzie odniesienia.

2.5. Techniki pomiaru promieniowych przemieszczeń względnych wałów

2.5.1. Czujniki bezdotykowe

Ze względu na duże prędkości liniowe powierzchni czopa obserwacja przemieszczeń względnych realizowana jest za pomocą czujników bezdotykowych. We współczesnych układach pomiarowych najczęściej stosowanymi czujnikami do pomiaru promieniowych przemieszczeń wału są bezdotykowe czujniki, działające na zasadzie prądów wirowych. Dalszy opis będzie ograniczony do zastosowań takich czujników.

Czujnik przemieszczeń względnych [31, 9], działający na zasadzie prądów wirowych, jest układem złożonym z właściwego czujnika oraz bloku oscylatora-modulatora. Właściwy czujnik jest złożony z cewki z uzwojeniem nawiniętym na izolatorze ceramicznym lub z tworzywa sztucznego. Prąd generatora wysokiej częstotliwości przepływa przez uzwojenie cewki i wytwarza szybkozmienne pole magnetyczne. W polu znajduje się powierzchnia wału, wykonana z materiału przewodzącego, w której indukowane są prądy wirowe. Zmiany wielkości szczeliny między czołem czujnika i wałem powodują zmiany amplitudy i fazy prądu płynącego w układzie czujnika i generatora. Układ demodulatora przekształca te zmiany w niskoczęstotliwościowe zmiany napięcia wyjściowego zależnego od wielkości szczeliny.

Układ pomiarowy wykorzystujący czujnik działający na zasadzie prądów wirowych ma charakterystykę liniową w szerokim zakresie mierzonych odległości. W zależności od średnicy czołowej czujnika stosowane są znormalizowane czułości takich czujników: 4, 8, 16 [mV/ μ m] oraz zakresy mierzonych wartości międzyszczytowych dla pomiarów dynamicznych odpowiednio 250, 500 i 1000 [μ m] [9, 85]. Czujniki te charakteryzują się pasmem przenoszonych częstotliwości od 0 do 5 (10) kHz.

Napięcie wyjściowe z czujnika zawiera składową stałą (najczęściej ujemną o dużej wartości średniej) oraz składową zmienną (o relatywnie małym zakresie zmian). Składowa stała jest proporcjonalna do odległości od czoła czujnika do powierzchni wału, składowa zmienna jest proporcjonalna do chwilowych zmian tej odległości.

Zaletami bezstykowych czujników wykorzystujących prądy wirowe są: niewielkie rozmiary, szeroki zakres temperatur, w których mogą być stosowane oraz brak wpływu olejów pokrywających wał na działanie czujnika.

Głównymi wadami bezstykowych czujników są:

- zależność charakterystyki od przenikalności magnetycznej i przewodności tworzywa wału (wymagana jest indywidualna kalibracja dla każdego rodzaju tworzywa wału);
- stan (falistość i chropowatość) oraz niejednorodności elektryczne i magnetyczne powierzchni wału współpracującej z czujnikiem są źródłem zakłóceń zwanych "runout";
- instalacja czujnika wymaga wielu zabiegów, co powoduje że czujniki mogą być stosowane przede wszystkim jako układy stacjonarne.

2.5.2. Lokalizacja i montaż czujników bezstykowych

Mocując czujnik do nie wirującej części maszyny wirnikowej w taki sposób, że oś czujnika leży w płaszczyźnie prostopadłej do osi wału, mamy możliwość obserwacji przemieszczeń wału względem obudowy czujnika w kierunku promieniowym. Zadania realizowane za pomocą pomiarów promieniowych przemieszczeń względnych wałów można podzielić na trzy grupy.

Pierwsze zadanie polega na śledzeniu promieniowych luzów pomiędzy wirnikiem i pozostałymi elementami maszyny, np. luzu występującego w uszczelnieniach [82]. Wówczas czujnik lokalizowany jest jak najbliżej kontrolowanych miejsc, np. uszczelnień.

Drugie zadanie polega na zastosowaniu czujników przemieszczeń względnych do identyfikacji postaci ugięć wału [62]. Wirniki współczesnych turbozespołów są wirnikami elastycznymi, a więc działają ugięte odpowiednio do złożonej postaci drgań własnych. Węzły takich drgań mogą występować w miejscach łożyskowania wału, co powoduje, że amplitudy przemieszczeń

względnych mierzone w łożyskach (pomiar w łożyskach opisano jako zadanie trzecie) są niewielkie mimo znacznych ugięć wału. W takich przypadkach zaleca się stosowanie dodatkowych układów czujników (najczęściej między łożyskiem a sprzęgłem).

Trzecie zadanie (uważane za najważniejsze) polega na obserwacji ruchu czopa w łożysku hydrodynamicznym [15]. Obserwacja jest prowadzona dla celów diagnostyki układu wirnikłożysko-podpora łożyskowa. Wówczas czujnik lokalizowany jest jak najbliżej łożyska. Omawiane poniżej zasady lokalizacji i montażu czujników odnoszą się głównie do realizacji zadania związanego z obserwacją ruchu czopa w łożysku hydrodynamicznym.

W maszynach małych i średniej wielkości czujniki przemieszczeń względnych wsuwa się w otwory wykonane w obudowie łożyska ślizgowego lub w korpusie maszyny, a następnie przymocowuje obudowy czujników do tych elementów [57]. Wówczas obserwowane są przemieszczenia czopa względem obudowy łożyska lub korpusu maszyny. W dużych maszynach (np. turbozespołów) najczęściej istnieje możliwość instalacji czujnika wewnątrz łożyska. Wówczas czujnik mocowany jest najczęściej do panewki łożyska i obserwowane są przemieszczenia czopa względem panewki łożyska.

W dalszej części pracy najczęściej używane będzie określenie "przemieszczenia czopa względem panewki łożyska", ale rozważania będą dotyczyły obydwu przypadków mocowania czujnika, opisanych wyżej.

W celu obserwacji trajektorii ruchu czopa należy zastosować dwa czujniki o osiach wzajemnie prostopadłych, zawartych w płaszczyźnie prostopadłej do osi wału. Wymaga to prowadzenia pomiaru w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach, umownie nazywanych kierunkiem pionowym oraz poziomym [4]. Kierunki te w starszych stacjonarnych układach do pomiaru przemieszczeń względnych odpowiadały rzeczywistym kierunkom : pionowemu i poziomemu (rys. 2.3).



- Rys. 2.3. Dwa sposoby doboru kierunków pomiarowych promieniowych przemieszczeń względnych wałów
- Fig. 2.3. Two principles of measure directions selection of radial relative displacements of rotor shaft

Ponieważ sztywność podpory łożyskowej w kierunku pionowym jest zazwyczaj inna niż sztywność w kierunku poziomym, a także ze względów montażowych (płaszczyzna podziału podpór jest najczęściej pozioma), zaleca się [18] wybór kierunków w taki sposób, by tworzyły one z poziomą płaszczyzną podziału korpusu maszyny kąt 45°, będąc do siebie prostopadłe. Wówczas przyjmuje się konwencję [4], że czujnik po lewej stronie (patrząc od strony napędu - np. w przypadku turbozespołu od strony turbiny) nazywany jest czujnikiem pionowym, a czujnik po prawej - poziomym.

Przyjęto, że sygnał zarejestrowany czujnikiem poziomym oznaczany jest x(t), natomiast czujnikiem pionowym y(t). Podczas wizualizacji trajektorii oraz wyników jej analiz należy uwzględniać położenie kierunków pomiarowych poprzez odpowiednią korektę kierunków, stosując obrót o odpowiedni kąt. Dopuszcza się tolerancję kąta prostego między osiami czujników ± 5° [4]. W przypadku większej odchyłki należy stosować korekcję [13].

2.6. Składowa stała i zmienna sygnału promieniowych przemieszczeń względnych

Sygnał otrzymywany z układu czujnika przemieszczeń względnych, będący przebiegiem napięcia, jest zależny do chwilowej odległości między czołem czujnika a powierzchnią wału. W sygnale tym można wyróżnić składową stałą i zmienną.

Składowa stała sygnału jest nośnikiem informacji o średnim położeniu wału względem elementu, do którego przymocowany jest czujnik i jest proporcjonalna do średniej odległości czoła czujnika od powierzchni wału. Wartość składowej stałej zależy od położenia czujnika względem wału, czyli średniej odległości między wałem a czujnikiem.

Składowa zmienna sygnału informuje o chwilowych zmianach położenia wału, będących przemieszczeniami (drganiami) wału w płaszczyźnie promieniowej. Jeżeli pomiar prowadzony jest w zakresie liniowym charakterystyki czujnika, wartość składowej zmiennej nie zależy od średniej odległości między czołem czujnika a powierzchnią wału.

Składowe stałe dwu sygnałów przemieszczeń względnych rejestrowanych w kierunkach wzajemnie prostopadłych, będących składowymi dwuwymiarowego sygnału przemieszczeń względnych, wyznaczają środek układu odniesienia względnej trajektorii centralnej i będą nazywane składową stałą sygnału dwuwymiarowego (rys. 2.4). Natomiast składowe zmienne dwu sygnałów przemieszczeń względnych x(t) i y(t) stanowią zapis względnej trajektorii centralnej i będą nazywane składową zmienną sygnału dwuwymiarowego.

W przemysłowych układach do pomiaru przemieszczeń względnych składowe stałe i zmienne sygnału, otrzymane z czujnika przemieszczeń względnych, rejestrowane i analizowane są osobno. Powodem tego jest różnica między bardzo dużą wartością składowej stałej i relatywnie niewielką wartością amplitudy składowej zmiennej. Nierozdzielenie składowych
sygnału wymagałoby stosowania kosztownych rozwiązań w celu zachowania odpowiedniej wartości ilorazu mocy sygnału do wartości skutecznej szumu.



Rys. 2.4. Układ współrzędnych względnej trajektorii centralnej Fig. 2.4. Coordinate system of the relative central trajectory

Wyznaczanie składowej stałej, czyli ocena wartości średniej sygnału przemieszczeń względnych, może być dokonywane analogowo lub cyfrowo, przy zastosowaniu odpowiedniego detektora wartości średniej. Czas uśredniania musi być wielokrotnością okresu obrotu wału. Wydzielenie składowej zmiennej dokonuje się z zastosowaniem układów analogowych.

Składowa stała umożliwia ocenę położenia wału względem obszaru określonego przez luz łożyska [78]. W łożyskach hydrodynamicznych między wałem a otworem panewki istnieje pewien luz, nazywany szczeliną smarną. Istnienie tego luzu wynika z zasady działania łożyska hydrodynamicznego, a jego postać i wielkość są ściśle określane podczas konstruowania łożyska.

Aby oceniać położenie środka wału w obrębie luzu promieniowego łożyska na podstawie składowej stałej sygnału przemieszczeń względnych, konieczne jest poczynienie odpowiednich zabiegów, opisanych w rozdz. 3.4.

2.7. Ocena dokładności pomiaru przemieszczeń względnych

2.7.1. Źródła odchyłek pomiarowych

Sygnał otrzymywany z czujnika drgań, działającego na zasadzie prądów wirowych, jest sumą sygnałów pochodzących od rzeczywistych drgań obserwowanego elementu i sygnałów pochodzących od deformacji mechanicznych i/lub własności fizycznych powierzchni wału. Zakłócenia pracy czujników wynikające ze stanu obserwowanej powierzchni wału noszą nazwę "runout" [98]. "Runout" dzieli się na mechaniczny i elektryczny.

"Runout" mechaniczny wynika z odchyłek kształtu powierzchni współpracującej z czujnikiem. Powierzchnia wału powinna być starannie przygotowana i mieścić się w odpowiedniej klasie odchyłek kształtu i położenia (odchyłki okrągłości i bicia) oraz chropowatości i falistości powierzchni (rysy, wgniecenia).

"Runout" elektryczny wynika z pozostałości magnetycznej, naprężeń szczątkowych i niejednorodności struktury wierzchniej warstwy wału. Występowanie obszarów magnetycznych na powierzchni wału lub stref o zróżnicowanym namagnesowaniu jest jedną z głównych przyczyn "runout" elektrycznego.

Przyczyną "runout" elektrycznego są również naprężenia szczątkowe, powstające na powierzchni wału w wyniku obróbki mechanicznej (toczenie, szlifowanie). Występowanie tych naprężeń powoduje zmienność oporu elektrycznego obserwowanej powierzchni wału, co wpływa na zmianę napięcia wyjściowego czujnika. Źródłem "runout" może być również niejednorodność struktury materiału, jak np. pustki materiałowe i wtrącenia.

2.7.2. Ograniczanie wpływu stanu powierzchni wału na wyniki pomiarów

Rozróżnia się kilka sposobów likwidacji "runout" [11]. Podstawowym i niezawodnym sposobem jest odpowiednie przygotowanie powierzchni wału współpracującej z czujnikiem. Wał powinien być wykonany w odpowiedniej klasie odchyłek kształtu i położenia. Obróbką wykańczającą powierzchnię powinno być nagniatanie powierzchniowe. W uzasadnionych przypadkach zaleca się również przeprowadzenie procesu odmagnetyzowania powierzchni wału. Opisane powyżej zabiegi mogą zredukować wartość "runout" o 80-90% [57]. W celu redukcji "runout" elektrycznego możliwe jest również pokrycie wału na całym obwodzie stopem miedzi.

Ponadto istnieją metody eliminacji "runout" poprzez elektroniczną obróbkę sygnału [98]. Metody te bazują na dokładnym zidentyfikowaniu tak zwanego wektora zniekształceń, czyli zniekształceń sygnałów otrzymywanych z czujników w funkcji drogi kątowej wału, przypadających na jeden obrót wału. Pomiaru zniekształceń sygnałów dokonuje się np. podczas obracania wału na obracarce. Następnie wektor zniekształceń odejmowany jest od sygnału zarejestrowanego podczas działania maszyny. Najczęściej metody te wymagają stosowania układów umożliwiających próbkowanie sygnałów ze stałym przyrostem drogi kątowej wału.

2.8. Pomiary towarzyszące

W badaniach maszyn wirnikowych istotną rolę spełniają sygnały, na podstawie których można dokonać identyfikacji:

- wyróżnionego położenia kątowego wału wirnika;
- wyróżnionych N>>1 położeń kątowych wału;
- chwilowej częstotliwości obrotów wirnika.

Sygnały te są otrzymywane przy wykorzystaniu specjalnych układów pomiarowych, np. czujnika optycznego lub magnetycznego, współdziałającego ze specjalnym znacznikiem (lub znacznikami), umieszczonym na powierzchni wirującego wału.

W maszynach wyposażonych w układy do pomiarów przemieszczeń względnych stosuje się dodatkowy czujnik przemieszczeń względnych, współpracujący ze znacznikiem, w postaci rowka lub karbu na wale. Układ pomiarowy wykrywający znacznik generuje sygnał, którego wartość zmienia się skokowo w momencie przejścia znacznika przed czołem czujnika.

Czujnik może również współpracować z większą liczbą znaczników, z reguły równomiernie naniesionych na obwodzie wału. Najczęściej do tego celu wykorzystywane są nakładane na wał tarcze z rowkami wykonanymi na obwodzie.

2.8.1. Identyfikacja wyróżnionego położenia kątowego wału wirnika

W badaniach drgań maszyn wirnikowych ważną informację niesie określenie dla każdego pełnego obrotu wału chwili czasu, w której wał zajmuje wyróżnione położenie kątowe (chwilowe wyróżnione położenie kątowe wału). Umożliwia to układ pomiarowy złożony z czujnika współdziałającego z jednym znacznikiem na obwodzie wału. Układy takie w literaturze nazywane są znacznikami fazy ("keyphasor") [9], a sam czujnik przemieszczeń względnych czujnikiem fazy ("keyphasor transducer"). W momencie przejścia znacznika przed czołem czujnika następuje skokowa zmiana wartości sygnału otrzymanego z czujnika fazy, która umożliwia określenie chwili czasu, w którym wał zajmuje określone położenie kątowe (wynikające z położenia czujnika). Chwila ta najczęściej zaznaczana jest na wykresie przebiegu czasowego sygnału dwuwymiarowego na przykład w postaci dużej kropki (rys. 2.5).

Identyfikacji chwilowego wyróżnionego położenia kątowego wału można w prosty sposób dokonywać podczas obserwacji sygnału dwuwymiarowego na oscyloskopie. Obserwując sygnał dwuwymiarowy na oscyloskopie, sygnał ze znacznika fazy wykorzystywany jest do sterowania jasnością obrazu oscyloskopu (wejście Z). Wartość sygnału z czujnika fazy chwilowo wzrasta w momencie przejścia znacznika przed czołem czujnika, co powoduje wzmocnienie jasności obrazu w postaci plamki na ekranie oscyloskopu.



Rys. 2.5. Sposób wizualizacji znacznika wyróżnionego położenia wału Fig. 2.5. The way of visualisation of the marker of the rotor discriminate angular position

Znacznik wyróżnionego położenia wału umożliwia dodatkowo przedstawianie kierunku wirowania środka czopa. Sposób ten wprowadziła firma Bently Nevada [87] i obecnie jest powszechnie stosowany. Na wykresie przebiegu czasowego sygnału dwuwymiarowego, na krótkim odcinku czasu poprzedzającym moment przejścia wału przed czołem czujnika, sygnał nie jest rysowany. Natomiast moment przejścia, jak poprzednio, zaznaczany jest dużą kropką (rys. 2.5). Wówczas wykres sygnału zarejestrowanego w czasie jednego obrotu wału, narysowany na płaszczyźnie prostokątnego układu współrzędnych, rozpoczyna się kropką a kończy krótką przerwą, co umożliwia określenie kierunku wirowania środka wału.

2.8.2. Identyfikacja wyróżnionych położeń

Układy umożliwiające identyfikację N>>1 wyróżnionych położeń wału wykorzystywane są do:

- próbkowania sygnałów ze stałym przyrostem drogi kątowej wału;
- elektronicznej eliminacji "runout".

Próbkowanie jest operacją określania chwil czasu, w których dokonywana jest estymacja wartości chwilowej sygnału analogowego. Dyskretyzacja ze stałym przyrostem drogi kątowej wału wymaga zastosowania przetwornika analogowo - cyfrowego, umożliwiającego sterowanie pobieraniem kolejnych próbek impulsami zewnętrznymi. Impulsy te generowane są w momencie przejścia kolejnych znaczników przed czołem czujnika. Takie rozwiązanie umożliwia dyskretyzację sygnału ze stałym przyrostem drogi kątowej przy zmieniającej się prędkości obrotowej wału.

Liczba N impulsów na obrót wirnika powinna być odpowiednio duża, aby dokładnie odwzorowywać postać trajektorii. Spełnione musi być twierdzenie o częstotliwości

próbkowania (dodatek A). Jeżeli zakłada się zastosowanie do analizy sygnałów algorytmu Szybkiej Transformacji Fouriera, zaleca się, aby liczba N była potęgą liczby 2 (np.: 64, 128 i więcej)

2.8.3. Pomiar prędkości obrotowej wirnika

Do pomiaru prędkości obrotowej maszyn wirnikowych najczęściej wykorzystywane są prądnice tachometryczne.

W przypadku maszyny działającej ze stałą prędkością obrotową określenie częstości obrotów wirnika umożliwia układ służący do identyfikacji wyróżnionego położenia wału. Częstotliwość obrotów wału wyznacza się na podstawie czasu trwania zadanej liczby obrotów. Dla maszyny działającej ze zmienną prędkością obrotową zaleca się stosowanie układów umożliwiających identyfikację większej liczby położeń kątowych wału.

3. PODSTAWOWE CECHY TRAJEKTORII

Na początku rozdziału omówiono sposoby analizy sygnałów rzeczywistych, będących sygnałami składowymi trajektorii, stosowane w diagnostyce technicznej. Następnie opisano uwzględniane obecnie cechy trajektorii w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz stosowane sposoby ich wyznaczania.

3.1. Cechy sygnałów

Podstawowym pojęciem teorii sygnału jest sygnał. Pojęciu temu przyporządkowuje się pewien abstrakcyjny model. Model powinien umożliwiać opis i analizę zjawisk, obserwowanych za pomocą sygnału. Klasyfikacja sygnału (przez którą rozumiemy określenie jego najbardziej ogólnych cech) ma zasadniczy wpływ na wybór metod analizy sygnału i na wybór identyfikowanych cech sygnału. Działanie, w wyniku którego otrzymuje się zbiór cech sygnału, nazywany analizą sygnału.

Przez sygnał rozumie się przebieg dowolnej wielkości fizycznej, będącej nośnikiem informacji. Opisu sygnału dokonuje się za pomocą zbioru jego cech [31]. Cechami sygnału, będącego procesem stochastycznym, są oceny (estymaty) tego procesu. Zakłada się, że cecha sygnału $x(t, \theta)$ jest funkcją czasu "makro" θ i nie jest zależna od czasu "mikro" t.

Wartościami cech mogą być:

- liczby (estymaty punktowe);
- funkcje (estymaty funkcyjne).

W przypadku cech funkcyjnych ich wartości mogą być poddane dyskretyzacji, w wyniku czego otrzymuje się ciąg wartości liczbowych, który może być zapisany jako uporządkowany zbiór wartości cech punktowych. Wartości cech najczęściej są liczbami. Założenie to nie zmniejsza ogólności pojęcia cechy, wymaga to jednak w przypadku wartości nie określonych bezpośrednio ilościowo (wartości jakościowe) przyjęcia kodu umożliwiającego zapisanie ich w postaci liczb [28]. Muszą mieć one wartość dyskretną, ale niekoniecznie liczbową. Cechy przedstawiane są za pomocą wielu liczb i wykresów stanowiących podstawę do wnioskowania diagnostycznego.

3.2. Analizy sygnałów składowych

Wyznaczanie cech sygnałów jednowymiarowych w dziedzinie czasu i częstotliwości dokonywane jest z wykorzystaniem standardowych analizatorów sygnałów. Wyznaczane są [31, 22]:

- przebiegi czasowe względnych przemieszczeń wałów dla obu kierunków pomiarowych;
- uśrednione przebiegi czasowe względnych przemieszczeń wałów, uśrednianie synchroniczne sterowane jest odpowiednim ciągiem impulsów identyfikujących wyróżnione położenie kątowe wału (sygnał ze znacznika położenia, najczęściej jeden impuls na obrót wału);
- amplitudowe i bezwymiarowe dyskryminanty liczbowe (np. wartości średnia, skuteczna, szczytowa lub międzyszczytowa);
- widma gęstości mocy;
- amplitudy i fazy wybranych składowych harmonicznych (najczęściej 0.5f_n, 1f_n, 2f_n gdzie f_n jest czestotliwością wirowania wału);
- gęstości rozkładu amplitud sygnałów;
- funkcje korelacji, kowariancji itp.

Analiza widmowa bazuje na modelach, w których sygnał rzeczywisty reprezentowany jest przez szereg Fouriera. Wynikiem analizy są widma : amplitudowe, fazowe i gęstości mocy. W wielu przypadkach analizowane sygnały przemieszczeń względnych należy uznać za stochastyczne; wówczas należy uwzględniać gęstości widmowe mocy sygnału. Techniki wyznaczania tych widm zostały opisane szeroko w literaturze [71, 7]. Szczególne znaczenie mają obecnie techniki cyfrowe bazujące na algorytmach szybkiej transformacji Fouriera (FFT).

W przypadku sygnałów zarejestrowanych podczas badań maszyn wirnikowych szczególne znaczenie mają składowe widm o częstotliwości obrotów wirnika i kolejne ich harmoniczne i subharmoniczne. Dla widm przemieszczeń względnych najczęściej składowe te są dominujące. W literaturze opisywane są relacje między występowaniem znaczących amplitud określonych składowych widm a niesprawnościami maszyny. W badaniach diagnostycznych obserwowane są wartości amplitud składowych widm oraz ich zmiany w funkcji czasu "makro".

Obserwowane są również zmiany faz poszczególnych składowych widm w funkcji czasu "makro". Informacje te są powszechnie wykorzystywane w diagnostyce, np. obserwacja zmian fazy pierwszej harmonicznej sygnału jest stosowana do oceny właściwości rezonansowych układu wirnik- łożyska - podpory. Obecnie brak jest ogólnie akceptowanych sposobów analizy umożliwiających wyznaczanie fazy składowych częstotliwościowych sygnałów opisujących trajektorie. Dla otrzymania wiarygodnych informacji o fazie składowych stosowana jest filtracja (sumowanie) synchroniczna [79].

Osobną grupę analiz stanowią analizy sygnałów przemieszczeń względnych rejestrowanych podczas badań prowadzonych w warunkach rozruchu i wybiegu maszyny. Stosowane są:

- Wykresy Bode'a, czyli wartości szczytowe lub międzyszczytowe amplitudy oraz wartości fazy pewnej wyróżnionej składowej - najczęściej 1fn (czyli tzw. pierwszej harmonicznej obrotów wirnika) - analizowanego sygnału w funkcji chwilowej prędkości obrotowej. Stosowane są do identyfikacji prędkości krytycznych, oceny thumienia w układzie oraz wyznaczania postaci drgań wirnika [15].
- Wykresy biegunowe (Nyquista) wartości szczytowej lub międzyszczytowej amplitudy składowej 1fn, na których oznacza się chwilową częstotliwość obrotów wirnika. Stosowane są do identyfikacji częstotliwości rezonansowych układu oraz szczególnie uwypuklają trendy zmian kąta przesunięcia fazowego [40].
- Widmowe charakterystyki wybiegowe w postaci wykresów kaskadowych widm krótkoczasowych w funkcji prędkości obrotowej wału. Stanowią one opis drgań w dziedzinie częstotliwości sygnałów zarejestrowanych w warunkach przejściowych [58].
- Cyfrowa filtracja nadążna (order tracking) składowych 0.5f_n, 1f_n, 2f_n itp. Wartości estymat uzyskiwane w ten sposób przedstawiane są w postaci wykresów w funkcji chwilowej prędkości obrotowej wału.
- Diagramy Campbella, służące do identyfikacji zjawisk rezonansowych w badanym układzie
 [17]. Sporządzane są w podwójnie liniowej skali częstotliwości, zaś w kierunku pionowym
 przedstawiane są odpowiedzi rezonansowe na wymuszenie składową, której częstotliwość
 odpowiada jakiejś częstotliwości charakterystycznej badanego układu (inna postać
 przedstawiania informacji zawartej w wykresie kaskadowym).

3.3. Podstawowe cechy trajektorii centralnych

3.3.1. Obserwacja trajektorii centralnych

Do obserwacji trajektorii centralnych ruchu środka czopa względem panewki łożyska wykorzystywane są oscyloskopy lub odpowiednie układy komputerowe i oprogramowanie. Trajektorie obserwowane są głównie podczas działania maszyny z ustaloną prędkością obrotową dla sygnałów o szerokim paśmie częstotliwościowym. Stosowane układy umożliwiają rysowanie trajektorii dla kilku kolejnych obrotów wału.

Drgania czopa względem panewki łożyska nie są procesem ściśle stacjonarnym, co powoduje, że dokonując pomiaru ruchu czopa na odcinku czasu większym niż jeden okres obrotu wału, otrzymujemy w ogólnym przypadku krzywą nie zamykającą się i nie pokrywającą w kolejnych okresach. Przykład wyniku obserwacji trajektorii przedstawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Przykład trajektorii Fig. 3.1. An example of the trajectory

Trajektoria stanowi dogodny do interpretacji sposób przedstawiania sygnału dwuwymiarowego. Analiza trajektorii umożliwia otrzymanie informacji niemożliwych do uzyskania, gdy analizowane są oddzielnie jedynie sygnały składowe. Cechy trajektorii stanowią ważne informacje diagnostyczne [84]. Obecnie cechy te oceniane są subiektywnie przez osobę prowadzącą badania [47]. Uwzględniane są takie cechy trajektorii, jak:

- wielkość trajektorii, gdzie pojęcie wielkości wymaga szczegółowego zdefiniowania;
- zwrot kierunku wirowania punktu na trajektorii;
- położenie kątowe trajektorii względem osi pionowej;
- okres trajektorii;
- kształt trajektorii;
- niezmienność cech trajektorii w czasie.

W literaturze [60, 15] opisywane są typowe relacje diagnostyczne między niesprawnościami maszyny wirnikowej a symptomami tego stanu, będącymi cechami trajektorii ruchu czopa względem panewki łożyska. Znane są relacje umożliwiające rozpoznawanie typowych niesprawności maszyn wirnikowych, takich jak: nadmierne niewyrównoważenie, przeciążenie, niestabilności działania łożysk ślizgowych, ocieranie części zespołu wirującego, pęknięcie wału wirnika.

Zalecane jest dodatkowe zastosowanie układu umożliwiającego obserwację znacznika wyróżnionego położenia kątowego wału (rozdz. 2.8.1). Cenną, wykorzystywaną informacją jest położenie znacznika na trajektorii oraz ewentualne zmiany tego położenia w funkcji czasu "makro". Często obserwacja zmian położenia znacznika jest wykorzystywana do identyfikacji zmian własności rezonansowych układu wirnik- łożyska- podpory.

Znacznik wyróżnionego położenia wału wykorzystywany jest również do wyznaczania okresu trajektorii. Najprostszym sposobem jest zastosowanie oscyloskopu, dla którego sygnał wyróżnionego położenia wału moduluje jasność obrazu na ekranie. Znacznik wskazuje wzmocnieniem jasności obrazu (plamką) na ekranie oscyloskopu kolejne obroty wału o kąt 360°. Wówczas liczba jednocześnie obserwowanych plamek na ekranie informuje o okresie sygnału wyrażonym w krotności obrotów wału (rys. 3.1).

Sygnał ze znacznika wyróżnionego położenia wału umożliwia dodatkowo identyfikację kierunku wirowania środka czopa. Stosuje się układy umożliwiające krótkotrwałe wygaśnięcie obrazu bezpośrednio przed jego rozjaśnieniem przez sygnał znacznika. Trajektoria rysowana w czasie jednego obrotu wału rozpoczyna się kropką, a kończy krótką przerwą, co umożliwia określenie kierunku wirowania środka wału (rys. 3.1).

3.3.2. Cechy punktowe

Obecnie oceny punktowe sygnałów są nadal najczęściej stosowane do oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych. Kryteria oceny stanu maszyn wirnikowych na podstawie ocen punktowych sygnałów promieniowych przemieszczeń względnych wałów są zawarte w normach VDI 2059 [86], ISO 7919 [43] i wielu normach API [1, 2, 3] oraz zaleceniach producentów systemów monitorowania maszyn [18, 20].

Część obecnie wyznaczanych wielkości uważanych za oceny punktowe trajektorii jest po prostu ocenami punktowymi sygnałów składowych zarejestrowanych we wzajemnie prostopadłych kierunkach. Przykładem może być wielkość wyznaczana z trajektorii, dla której budowane są kryteria zawarte w normach API. Wielkością tą jest "równoważna podwójna amplituda drgań względnych", będąca wartością większą spośród dwóch amplitud międzyszczytowych wyznaczanych dla obydwu kierunków pomiarowych [88].

Obecnie jedyną szeroko stosowaną wielkością wyznaczaną na podstawie trajektorii, będącą oceną punktową sygnału dwuwymiarowego, jest "maksymalne przemieszczenie wału" oznaczane przez s_{max}, dla której budowane są kryteria zawarte w normie VDI i ISO. Poniżej przedstawiono opisany w normach sposób jej wyznaczania.

Średnie wartości sygnałów x(t) i y(t) wyznaczane dla badanego odcinka czasu umożliwiają wyznaczenie przedstawionych na rys. 3.2 osi centralnych G₁, G₂, odpowiadających zerowym

wartościom średnim amplitud chwilowych sygnału (czyli przemieszczeń). Jeżeli czujniki drgań są wzajemnie prostopadłe, chwilowe przemieszczenie wału (promień trajektorii) $s_k(t)$ można wyznaczyć jako funkcję czasu z zależności:

$$s_k(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}$$
, (3-1)

na podstawie którego można wyznaczyć "maksymalne przemieszczenie wału" z zależności:

$$s_{\max} = \max(s_k(t)). \tag{3-2}$$

Odcinek czasu, dla którego wyznaczana jest wielkość smax, musi być

odpowiednio długi, najlepiej, jeżeli będzie całkowitą wielokrotnością okresu sygnału dwuwymiarowego. Wielkość s_{max} jest maksymalnym promieniem względnej trajektori centralnej.

Kryteria oceny stanu dynamicznego turbin zamieszczone w normie VDI 2059 rozróżniają trzy drganiowe stany maszyny: normalny, alarmowy oraz stan wymagający natychmiastowego zatrzymania maszyny. Przedstawiona w normie ocena stanu technicznego maszyn wirnikowych dokonywana jest na podstawie wartości "maksymalnego przemieszczenia drgań" s_{max} , przy czym wartości kryterialne określające stan maszyny definiowane są w dwojaki sposób.

Pierwszy sposób definiowania wartości kryterialnych stosowany jest wtedy, gdy brak jest informacji na temat właściwości drganiowych turbiny, a w szczególności, gdy nie są znane normalne poziomy drgań. Wówczas stan drganiowy turbiny oceniany jest na podstawie ustalonych w normie granicznych wartości s_{max} , które najczęściej są zależne od nominalnej prędkości obrotowej wału.



Rys. 3.2. Wielkości opisujące trajektorię zalecane w normie VDI 2059 [86] Fig. 3.2. Characteristics that describe the trajectory recommended by VDI 2059 [86]

Drugi sposób definiowania wartości kryterialnych, określających stan turbiny, stosowany jest wówczas, gdy normalny poziom drgań (np. występujący przez dłuższy okres czasu) dla danych warunków działania jest wielkością znaną o stałej wartości, nie zmieniającej się w czasie eksploatacji maszyny. Z doświadczeń wynika, że wartość tego poziomu dla różnych łożysk, np. tej samej turbiny, może być różna. Zależy ona również od warunków działania maszyny. Z tego powodu normalne poziomy drgań powinny być określane osobno dla poszczególných łożysk oraz dla warunków działania turbiny (takich jak: temperatura i ciśnienie pary, obciążenie) zawartych w pewnych przedziałach. O zaistnieniu stanu alarmowego decyduje przyrost wartości s_{max} ponad normalny poziom drgań. Wymagana wartość przyrostu s_{max} jest ustalana w zależności do nominalnej prędkości obrotowej turbiny lub wartości s_{max} dla normalnego poziomu drgań.

Dla wielu zastosowań (między innymi dla potrzeb systemów doradczych) celowe jest definiowanie cech trajektorii w sposób umożliwiający określenie przynależności ich do klasy (np. mała, duża). Przy ocenie wielkości trajektorii cechą taką może być wartość s_{max} odniesiona do wartości luzu promieniowego w łożysku (rozdz. 3.4).

W literaturze podawane są także zalecenia, dotyczące oceny stanu maszyn na podstawie promieniowych przemieszczeń względnych wału, stosowanych przez producentów systemów monitorowania stanu maszyn wirnikowych. Metody te wykorzystują zalecane we wspomnianych normach oceny punktowe, głównie koncentrując się na:

- sposobach identyfikacji zmian poziomów drgań;
- identyfikacji dynamiki tych zmian.

3.3.3. Stosowane obecnie metody analizy częstotliwościowej trajektorii

Stosowaną obecnie analizę częstotliwościową sygnałów rzeczywistych, będących składowymi sygnału dwuwymiarowego, opisano w rozdz. 3.1. Poniżej omówiono metody analizy częstotliwościowej sygnałów dwuwymiarowych, umożliwiające opis trajektorii centralnej zbiorem jego składowych częstotliwościowych.

Obecnie najczęściej do tego celu wykorzystywany jest układ składający się z dwóch filtrów środkowoprzepustowych oraz oscyloskopu (rys.3.3) lub odpowiedniego oprogramowania zastępującego oscyloskop. Metoda ta jest wykorzystywana między innymi w układach analizy sygnałów systemów monitorowania stanu maszyn [8].

W celu obserwacji składowej częstotliwościowej sygnału dwuwymiarowego o wybranej częstotliwości f należy częstotliwość środka pasma filtrów ustawić na zadaną częstotliwość f, a szerokość pasma winna być odpowiednio mała. Wizualizacja przebiegu czasowego tak otrzymanej składowej częstotliwościowej może być dokonywana na oscyloskopie. Zgodnie z [22] opisany sposób postępowania nazywany jest selekcją sygnału w dziedzinie częstotliwości.

Obecnie obserwuje się jedynie wybrane składowe częstotliwościowe sygnału dwuwymiarowego, odpowiadające wąskim pasmom częstotliwości sygnału. Środki tych pasm odpowiadają najczęściej częstotliwościom obrotów wirnika oraz kilku (2-3) kolejnym harmonicznym lub subharmonicznym. W celu uzyskania dokładnych wyników niezbędna jest wysoka symetria fazowa obu torów pomiarowych, charakteryzująca się bardzo małym przesunięciem fazowym między kanałami.



- Rys. 3.3. Układ pomiarowy umożliwiający obserwację wybranych składowych częstotliwościowych sygnału dwuwymiarowego
- Fig. 3.3. Measuring arrangement used to determine frequency components of the two-dimensional signal

Drgania maszyn wirnikowych najczęściej można uznać za procesy dynamiczne słabo okresowe. Złożone są one z procesu zdeterminowanego - poliharmonicznego i zakłóceń o szerokim widmie (tzw. szumu). Wówczas w widmie dominują składowe o częstotliwości podstawowej, związanej z liczbą obrotów oraz szereg liniowo zależnych wyższych składowych widmowych (harmonicznych). Podczas analizy takich sygnałów plamka na ekranie oscyloskopu zatacza krzywą zbliżoną do elipsy (jest to zależne od szerokości filtru). W skrajnych przypadkach może to być okrąg lub odcinek. Przykład przedstawiono na rys. 3.4. Podczas analizy sygnału losowego obserwowana składowa częstotliwościowa może przyjmować kształt dowolnych krzywych i zmieniać się w czasie.

Cechy tak otrzymanych składowych częstotliwościowych sygnału dwuwymiarowego wykorzystywane są w relacjach diagnostycznych. Najważniejsze cechy, na które zwracana jest uwaga, to : wielkość elipsy, jej kształt (płaskość), kierunek wirowania oraz zmiana położenia znacznika wyróżnionego położenia kątowego wału. W celu zaobserwowania kierunku wirowania składowej oraz znacznika wyróżnionego położenia kątowego wału konieczne jest zastosowanie specjalnego układu pomiarowego opisanego w rozdz. 2.8.1.

Wadą opisanej metody jest konieczność stosowania specjalnego układu aparatury oraz ograniczenie analiz jedynie do niewielkiej liczby (z góry określonych) składowych częstotliwościowych. Identyfikacja cech składowych dokonywana jest najczęściej przez osobę prowadzącą analizę w wyniku ich obserwacji na ekranie, np. oscyloskopu.

Automatyczna identyfikacja cech składowych częstotliwościowych wymaga opracowania specjalnych algorytmów. Realizujące te algorytmy oprogramowanie wyznaczałoby cechy na podstawie sygnałów otrzymanych na wyjściu filtrów wąskopasmowych, zapisanych w postaci cyfrowej.



Rys. 3.4. Przykład składowej częstotliwościowej trajektorii centralnej Fig. 3.4. An example of the central trajectory frequency component

Identyfikacja składowych częstotliwościowych sygnałów dwuwymiarowych może być przeprowadzana na podstawie amplitud i faz odpowiednich składowych częstotliwościowych sygnałów zarejestrowanych w kierunku pomiarowym pionowym i poziomym. W tym celu wymagana jest znajomość widm amplitudowo-fazowych sygnałów składowych. Przykładem zastosowania tej metody może być oprogramowanie wykonane w ramach systemu PAS7 [14, 26, 27].

Wadami tej metody są :

- Ograniczenie możliwości jej stosowania jedynie do analizy sygnałów, które można uznać za poliharmoniczne.
- Przy zastosowaniu cyfrowych metod analizy dodatkowe zniekształcenia wprowadzają błędy wynikające z dyskretnej natury tych analiz. Efekt palisadowy i konieczność stosowania okien czasowych powodują trudne do skorygowania zniekształcenia, szczególnie widm fazowych.

3.4. Podstawowe cechy trajektorii niecentralnych

Zgodnie z rozdz. 2.3 trajektorią niecentralną nazywana jest trajektoria rozpatrywana w takim układzie współrzędnych, którego osie pokrywają się z osiami głównej czułości czujników przemieszczeń względnych. Składowa stała sygnału dwuwymiarowego, opisującego trajektorię niecentralną, umożliwia obserwację położenia środka wału względem panewki łożyska, do

której przymocowane są czujniki. Stwarza to możliwości oceny położenia środka wału w obrębie luzu promieniowego łożyska hydrodynamicznego.

Najczęściej stosowane są panewki z otworem kołowym cylindrycznym [50, 5]. Obecnie również budowane są łożyska, w których otwory w panewkach mają kształt soczewkowy, trójklinowy itp. W łożysku z panewką z otworem kołowym cylindrycznym istnienie szczeliny smarnej powoduje, że oś wału może przemieszczać się wewnątrz okręgu o środku odpowiadającym osi panewki i średnicy równej luzowi promieniowemu łożyska. Promień tego okręgu ΔR można wyznaczyć jako połowę różnicy średnicy otworu panewki i średnicy czopa. W łożysku z panewką z otworem innym niż kołowy cylindryczny luz promieniowy łożyska przybiera kształt odpowiadający luzom. Na przykład luz promieniowy łożyska, w którym otwór w panewce ma kształt soczewkowy, ma również kształt soczewki.

Aby móc określić położenie środka wału w obrębie luzu promieniowego, na podstawie składowych stałych sygnałów przemieszczeń względnych, należy:

- znać geometrię luzu promieniowego łożyska;
- określić co najmniej dla jednego położenia wału współrzędne środka wału w układzie związanym ze środkiem panewki.

Zakładając, że podczas postoju maszyny (gdy wał nie obraca się) wał spoczywa swobodnie na dnie panewki, można przyjąć, że jego współrzędne w układzie związanym ze środkiem panewki z otworem kołowym cylindrycznym wynoszą odpowiednio: na osi poziomej 0, na osi pionowej $-\Delta R$.

Wyniki pomiarów położenia środka wału w obrębie luzu promieniowego łożyska hydrodynamicznego są wykorzystywane do określania stanu technicznego maszyn wirnikowych. Wyznaczane jest średnie położenie środka wału w układzie współrzędnych związanych z osią panewki. W literaturze zaleca się:

- sprawdzanie luzu między czopem a panewką w celu wykrycia ewentualnego przycierania [78];
- sprawdzanie średniego położenia czopa dla poprawnie działającego łożyska hydrodynamicznego środek wału powinien zajmować określone położenie względem panewki łożyska [5]; znane [82] są obszary w obrębie luzu promieniowego, w których następuje utrata stabilności działania łożyska;
- obserwację zmian średniego położenia czopa w funkcji czasu "makro"[60,82];
- obserwację zmian średniego położenia środka czopa w przejściowych warunkach działania, najczęściej podczas rozruchu lub wybiegu albo przy skokowej zmianie jakiegoś czynnika (np. obciążenia maszyny)[78, 95].

3.5. Uśrednianie synchroniczne

W rozdz. 3.2 zwrócono uwagę na niedogodności opisanych tam metod analizy częstotliwościowej, a szczególnie trudności związanych z wyznaczaniem widm fazowych, w obecności zakłóceń oraz fluktuacji chwilowej prędkości obrotowej maszyny wirnikowej.

Jednym z możliwych sposobów rozwiązania tych problemów jest zastąpienie sygnałów, będących bezpośrednimi wynikami eksperymentu, odpowiednim sygnałem uśrednionym [6, 34, 79]. Proces uśredniania sygnału opisującego trajektorię może być realizowany jako uśrednianie synchroniczne [58, 59].

Badając maszyny zawierające elementy wirujące, zakładamy często, że ich działanie jest w przybliżeniu procesem cyklostacjonarnym [28]. Oznacza to, że ciąg zjawisk związanych z działaniem maszyny powtarza się po okresie *T*, gdzie okres *T* jest wartością stałą lub w przybliżeniu stałą. Najczęściej przyjmuje się, że okres jest równy okresowi obrotów wału maszyny. Wówczas początek każdego okresu może być identyfikowany za pomocą odpowiedniego sygnału "wyzwalającego", otrzymanego np. z czujnika wyróżnionego położenia kątowego wału.

Uśrednianie synchroniczne przeprowadzane jest najczęściej w dziedzinie czasu. Sterowane jest ciągiem impulsów identyfikujących wyróżnione położenie kątowe wału. Jego wynikiem jest uśredniony, na odcinku czasu *T*, przebieg wartości chwilowych obserwowanych sygnałów.

Składowe sygnału, które nie są synchroniczne z rozpatrywanym okresem *T*, ulegają tłumieniu. Przed podjęciem decyzji o długości zastosowanego okresu należy dokładnie sprawdzić, czy w obserwowanym sygnale brak jest istotnych składowych subharmonicznych względem okresu podstawowego. Zastosowanie uśredniania synchronicznego spowoduje "odfiltrowanie" tych składowych.

Podczas analizy sygnałów zawierających składowe o częstotliwościach będących subharmonicznymi częstości obrotów wału sygnał należy uśredniać na odcinku czasu o długości będącej odpowiednio dobraną wielokrotnością okresu obrotu wału. Obecnie, dla celów analizy trajektorii, uśrednianie synchroniczne przeprowadzane jest niezależnie dla obu sygnałów składowych, opisujących trajektorię. W niniejszej pracy sygnały opisujące trajektorę poddawane są analizie wspólnie jako jeden sygnał dwuwymiarowy. Sumowanie synchroniczne sygnału dwuwymiarowego sprowadza się do sumowania wektorów, których współrzędne, w prostokątnym układzie współrzędnych, są chwilowymi wartościami sygnałów składowych opisujących trajektorię. Oznacza to, że sumowanie synchroniczne sygnały opisujących trajektorię traktowanych jako jeden sygnał dwuwymiarowy lub dwa sygnały jednowymiarowe jest równoważne.

4. CECHY TRAJEKTORII CENTRALNYCH

W rozdziale zaproponowano cechy trajektorii ruchu środka wału w łożysku ślizgowym oraz metody ich wyznaczania. Dla celów analizy trajektorię zapisano w postaci sygnału zespolonego. Następnie opisano metody wyznaczania zaproponowanych cech trajektorii w dziedzinie czasu i częstotliwości, z wykorzystaniem dyskretnej transformacji Fouriera sygnału zespolonego. Algorytmy umożliwiające zastosowanie opracowanych metod, wykorzystujące techniki cyfrowe, pokazano w dodatku F.

4.1. Wstęp

Trajektorie ruchu środka czopa względem panewki łożyska obserwowane są od dawna jako symptomy stanu technicznego maszyn wirnikowych. Uwzględniając potrzeby automatyzacji procesu wnioskowania o stanie technicznym maszyn, podjęto próbę zestawienia ilościowych i jakościowych cech trajektorii.

Opisanym w niniejszym rozdziale analizom poddawane są względne trajektorie centralne, zdefiniowane w rozdz. 2.3. Wymaga to przyjęcia nowego układu współrzędnych, w którym rozpatrywana jest trajektoria. Współrzędnymi środka tego układu są wartości średnie zbioru wartości chwilowych sygnałów składowych trajektorii. W celu wyznaczenia trajektorii centralnej podczas przetwarzania wstępnego należy sygnały składowe trajektorii, zarejestrowane w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach, przekształcić zgodnie ze wzorami (2-3) i (2-4) do postaci, w której ich wartości średnie równe są zero.

Celem niniejszego rozdziału jest określenie zbioru cech trajektorii, które mogą być wyznaczane automatycznie i które mogą być przydatne w procesie wnioskowania o stanie technicznym. Zwrócono uwagę na możliwe zakresy zastosowań omawianych cech sygnałów. Rozpatrywane są:

- dokładnie zdefiniowane i dobrze znane z literatury cechy sygnałów rozpatrywanych w dziedzinie czasu i częstotliwości;
- cechy sygnałów wprowadzone w postaci definicji heurystycznych zaproponowanych przez autora.

Cechy sygnałów wprowadzane będą z zastosowaniem różnych ich modeli. W wielu zagadnieniach zespolona reprezentacja sygnału fizycznego ułatwia analizę formalną właściwości sygnału i opis przekształceń wykonywanych na sygnale [46]. W pracy do opisu i rozwiązania wielu zagadnień przyjęto zapis sygnału dwuwymiarowego, opisującego trajektorię w postaci zespolonej. Zgodnie z rozdziałem 2.2 chwilowe wartości sygnału dwuwymiarowego odpowiadają współrzędnym punktów w prostokątnym układzie współrzędnych. Wykorzystując istnienie wzajemnie jednoznacznej odpowiedniości między uporządkowanymi parami współrzędnych kartezjańskich punktów a liczbami zespolonymi [53], płaszczyznę, w której opisywana jest trajektoria, można rozpatrywać jako płaszczyznę zespoloną. Wówczas sygnał dwuwymiarowy (opisujący trajektorię) można rozpatrywać jako sygnał zespolony zmiennej rzeczywistej.

Sygnał zespolony z(t) można przedstawić w postaci $z(t)=\text{Re } z(t) + j\cdot\text{Im } z(t)$, gdzie część rzeczywista Re z(t) i część urojona Im z(t) są rzeczywistymi funkcjami czasu. Osie układu współrzędnych zespolonych odpowiadają wzajemnie prostopadłym osiom czujników, za pomocą których otrzymano składowe sygnału dwuwymiarowego x(t) i y(t), opisujące przemieszczenia w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach. Przyjmując za Re z(t) sygnał x(t), a za Im z(t) sygnał y(t), będące sygnałami jednowymiarowymi zarejestrowanymi we wzajemnie prostopadłych kierunkach pomiarowych, sygnał dwuwymiarowy można zapisać w postaci zespolonej $z(t)=x(t)+j\cdot y(t)$ lub odpowiadającej mu uporządkowanej pary sygnałów $z(t)=\langle x(t), y(t)\rangle$.

4.2. Rodzaje trajektorii

Ogólną klasyfikację trajektorii można przeprowadzić podobnie jak klasyfikację jej składowych, będących sygnałami rzeczywistymi jednowymiarowymi [31, 7]. Trajektorii przyporządkować można pewien model, umożliwiający opis i analizę zjawisk obserwowanych za jej pomocą. Klasyfikacja trajektorii (przez którą rozumiemy określenie jej najbardziej ogólnych właściwości) ma zasadniczy wpływ zarówno na wybór metod analizy trajektorii, jak i na wybór jej cech, ocenianych lub identyfikowanych w wyniku analizy.

Założono, że wszystkie rozpatrywane trajektorie ruchu środka czopa w łożysku ślizgowym obserwowane są w warunkach umożliwiających identyfikację wyróżnionego położenia kątowego wału. Chwile czasu, w których wał, dla każdego pełnego obrotu, zajmuje wyróżnione położenie kątowe, zaznaczane są na trajektorii kropką. Na wykresach tych pomijany jest niewielki fragment trajektorii występujący bezpośrednio za kropką, co umożliwia zaznaczenie zwrotu trajektorii.

Najogólniej trajektorie możemy podzielić na zdeterminowane i losowe. Spośród trajektorii zdeterminowanych możemy wyróżnić trajektorie okresowe.

4.2.1. Trajektorie harmoniczne

Najprostszymi i zarazem podstawowymi trajektoriami okresowymi są trajektorie harmoniczne w kształcie elips, których przykład pokazano na rys. 4.1. Są to trajektorie, których składowe w dziedzinie czasu można zapisać za pomocą uporządkowanej pary funkcji harmonicznych

$$f(t) = \langle x(t), y(t) \rangle = \langle X \cdot \cos(2\pi f t + \theta_x), Y \cdot \cos(2\pi f t + \theta_y) \rangle,$$

gdzie: X, Y są amplitudami, f - częstotliwością (w [Hz]), θ_x i θ_y - fazami początkowymi, wyrażonymi w radianach. Tak zapisana trajektoria harmoniczna identyfikowana jest pięcioma liczbami f, X, Y, θ_x i θ_y .

Innym sposobem zapisu trajektorii harmonicznej jest

$$x(t) = A\sin(2\pi f t) + B\cos(2\pi f t) \qquad y(t) = C\sin(2\pi f t) + D\cos(2\pi f t).$$
(4-2)

(4-1)

Tak zapisana trajektoria identyfikowana jest pięcioma liczbami f, A, B, C i D.

Jeżeli częstotliwość trajektorii f jest równa częstotliwości obrotów wału f_n , to punkt reprezentujący środek wału zatacza pełną elipsę podczas obrotu wału o 360°. Znacznik wyróżnionego położenia wału zajmuje stałe położenie na trajektorii i dla kolejnych obrotów wału pokrywa się. Na trajektorii, obserwowanej w dłuższym przedziale czasu, widoczny jest jeden znacznik (jedna kropka).

Drugim ważnym przypadkiem jest sytuacja, w której częstotliwość obrotów wału f_n jest całkowitą wielokrotnością częstotliwości trajektorii f, czyli częstotliwość trajektorii jest subharmoniczną częstotliwości obrotów wału $f_n = nf$. Jeżeli np. $f_n = 2f$, to punkt materialny, reprezentujący środek wału, zatacza pełną elipsę podczas dwu kolejnych obrotów wału o 360°. Wówczas widoczne są dwa znaczniki zajmujące stałe położenie na trajektorii.

Trzecim ważnym przypadkiem jest sytuacja, w której częstotliwość trajektorii f jest całkowitą wielokrotnością częstotliwości obrotów wału f_n , czyli częstotliwość trajektorii jest superharmoniczną częstotliwości obrotów wału. Jeżeli np. $f=2f_n$, wówczas punkt materialny reprezentujący środek wału podczas obrotu wału o 360° zatacza dwie pelne elipsy. Znacznik wyróżnionego położenia wału dla kolejnych obrotów trajektorii pokrywa się. Na trajektorii widoczny jest jeden znacznik, zajmujący stałe położenie.





Ostatnim najogólniejszym przypadkiem jest sytuacja, w której częstotliwość trajektorii f nie jest całkowitą wielokrotnością częstotliwości obrotów wały f_n . Wówczas na trajektorii obserwowanej w dłuższym przedziale czasu widocznych jest kilka lub wiele znaczników, zajmujących różne położenie na trajektorii.

4.2.2. Trajektorie poliharmoniczne

Trajektorie poliharmoniczne można opisać w dziedzinie czasu za pomocą liniowej kombinacji kilku składowych trajektorii harmonicznych. Liczba tych składowych w ogólnym przypadku może być nieskończona. Aby sygnał mógł być uznany za poliharmoniczny, częstotliwość każdej jego składowej musi być całkowitą wielokrotnością jednej częstotliwości podstawowej.

Najczęściej, w przypadku maszyn wirnikowych, składowymi trajektorii poliharmonicznej są: trajektoria harmoniczna o częstotliwości obrotów wirnika i kolejne składowe trajektorie, będące jej subharmonicznymi i superharmonicznymi. O liczbie jednocześnie obserwowanych znaczników decyduje składowa harmoniczna o najmniejszej częstotliwości (zgodnie z zasadami opisanymi powyżej).

Przykład okresowej trajektorii poliharmonicznej o częstotliwości podstawowej $f_0=0.5f_n$, złożonej ze składowych harmonicznych o częstotliwości lf_n i $0.5f_n$, pokazano na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Przykład trajektorii poliharmonicznej Fig. 4.2. An example of the polyharmonic trajectory

4.2.3. Trajektorie prawie okresowe

Trajektorią prawie okresową jest trajektoria, która w dziedzinie częstotliwości może zostać opisana w postaci kombinacji liniowej dowolnej liczby składowych harmonicznych takich, że istnieją co najmniej dwie składowe, dla których iloraz ich częstotliwości jest liczbą niewymierną. Nie istnieje wówczas okres podstawowy tego sygnału. Dla trajektorii takich można wyróżnić powtarzające się fragmenty, lecz nie pokrywające się i przesunięte względem siebie o pewien kąt.



Rys. 4.3. Trajektoria prawie okresowa Fig. 4.3. An example of the almost periodic trajectory

Okres powtarzającego się fragmentu trajektorii prawie okresowej nie jest całkowitą wielokrotnością obrotów wału. Powoduje to, że znacznik (lub znaczniki) zmienia swoje położenie na trajektorii, przemieszczając się w jednym kierunku. Przykład trajektorii prawie okresowej pokazano na rys. 4.3.

4.2.4. Trajektorie slabo okresowe

Trajektorie słabo okresowe złożone są ze składowej zdeterminowanej, będącej trajektorią poliharmoniczną i składowej losowej o szerokim widmie, będącej zakłóceniem (tzw. szumem). Wynikiem analizy widmowej trajektorii słabo okresowych są widma z wyraźnymi, o dużej amplitudzie, składowymi harmonicznymi na tle szerokopasmowego szumu.



Rys. 4.4. Trajektoria słabo okresowa Fig. 4.4. An example of the low-periodic trajectory

Tak jak w przypadku sygnałów poliharmonicznych, o liczbie znaczników na trajektorii, obserwowanej na odcinku czasu równym okresowi podstawowemu, decyduje składowa harmoniczna o najmniejszej częstotliwości, zgodnie z zasadami opisanymi dla trajektorii harmonicznych. Podczas obserwacji na długim odcinku czasu (będącym wielokrotnie dłuższym od okresu podstawowego) składowa losowa sygnału powoduje, że położenie znacznika na trajektorii zmienia się w niewielkim zakresie. Zakres zmian zależy od wielkości składowej losowej odniesionej do głównych składowych harmonicznych.

Przykład trajektorii słabo okresowej pokazano na rys. 4.4. Dla trajektorii dominującymi składowymi są harmoniczne o częstotliwości $1f_n$ i $0.5f_n$.

4.2.5. Trajektorie losowe

Sygnał losowy określany jest przez zbiór jego realizacji [31, 83]. Można przyjąć, że trajektoria obserwowana w ograniczonym przedziale czasu stanowi realizację trajektorii losowej, opisanej za pomocą funkcji losowej $z_{\alpha}(t)$. Każda realizacja trajektorii losowej może mieć inny, niepowtarzalny kształt. Na wykresie trajektorii, obserwowanej w dłuższym odcinku czasu, położenie znaczników jest przypadkowe.

Trajektoria losowa jest więc w pełni opisana poprzez zbiór funkcji losowych $\{z_{\alpha}(t) | \alpha \in \Gamma\}$, gdzie Γ jest przeliczalną lub nieprzeliczalną liczbą elementów zbioru. Dla ustalonej chwili czasu t_1 zbiór $\{z_{\alpha}(t_1) | \alpha \in \Gamma\}$ określa zmienną losową, nazywaną również wartością sygnału losowego. Trajektoria losowa może być również opisana przez zbiór zmiennych losowych $\{\{z_{\alpha}(t) | \alpha \in \Gamma\} | t \in T\}$, gdzie T oznacza zbiór chwil czasu, w których określane są funkcje losowe. Pełnej identyfikacji cech trajektorii losowej można dokonać na podstawie zbioru wszystkich jej realizacji.



Rys. 4.5. Przykład trajektorii losowej [48] Fig. 4.5. An example of the random trajectory [48]

W celu opisania trajektorii losowej należy wyznaczyć wartości jej cech będące liczbami lub funkcjami. Wyznaczanie wartości cech na podstawie wszystkich realizacji jest niemożliwe. Przyjmuje się, że wartościami cech trajektorii losowej są ich oceny (estymaty). Dodatkowo zakłada się, że cechy trajektorii losowej nie są zależne od czasu "mikro" *t*. Pozwala to na estymację cech w dowolnej chwili czasu trwania realizacji. Wymaga to jednak założenia, że trajektoria jest stacjonarna.

W teorii analizy sygnałów wyróżnia się dwa pojęcia stacjonarności sygnałów [83, 71].

- Stacjonarność w szerokim sensie, która oznacza, że wszystkie momenty statystyczne sygnału są niezależne od czasu.
- Stacjonarność w wąskim sensie, która oznacza, że podstawowe momenty statystyczne sygnału (wartość średnia i autokorelacja) są niezależne od czasu.

W praktycznych zagadnieniach przyjmuje się [7], że wystarczy wykazać stacjonarność sygnału w wąskim sensie.

Przyjmując zapis trajektorii w postaci sygnału zespolonego, rozważania na temat stacjonarności trajektorii sprowadzają się do rozważań na temat stacjonarności sygnału zespolonego. Zgodnie z [83] sygnał losowy zespolony $z(t)=x(t)+j\cdot y(t)$ nazywamy sygnałem stacjonarnym, jeżeli sygnały (rzeczywiste) x(t) i y(t) są łącznie stacjonarne. Z kolei dwa sygnały losowe rzeczywiste nazywamy sygnałami łącznie stacjonarnymi, jeżeli oba są sygnałami stacjonarnymi oraz ich funkcja korelacji wzajemnej jest niezależną od czasu funkcją przesunięcia (opóźnienia) czasowego.

4.3. Okres trajektorii

4.3.1. Pojęcie okresu trajektorii okresowej

Podstawową cechą trajektorii, określaną na podstawie obserwacji w dziedzinie czasu, jest jej okres. Znane są [15] relacje diagnostyczne pomiędzy niesprawnościami maszyny wirnikowej a cechami opisującymi okresowość trajektorii ruchu środka czopa w łożysku, obserwowanej na ekranie.

W przypadku dokonywanej subiektywnie oceny okresowości trajektorii, obserwowanej na ekranie oscyloskopu, trajektoria okresowa tworzy krzywą zamkniętą o kształcie niezmiennym w funkcji czasu (rys. 4.2). Oznacza to, że sygnał w czasie kolejnych okresów tworzy krzywe zamknięte i pokrywające się. Trajektorią nieokresową nazywa się trajektorię, która tworzy krzywą płaską o kształcie zmieniającym się w czasie, dla której nie można wyróżnić powtarzającego się fragmentu (rys. 4.5)

Podejmując próbę automatycznego wyznaczania okresu trajektorii, należy w pierwszej kolejności określić, czy trajektoria jest okresowa. W przypadku gdy trajektoria ruchu środka czopa jest okresowa, ważną jej cechą jest wartość okresu. W przypadku trajektorii "idealnie" okresowej należy wyznaczyć zamknięty, powtarzający się fragment trajektorii (odpowiadający jej okresowi), który nałożony na poprzedzający go fragment powinien go dokładnie pokryć.

W praktyce fragmenty trajektorii odpowiadające kolejnym okresom nie będą się idealnie pokrywały i nie będą krzywymi dokładnie zamykającymi się (rys. 4.4). Powodem tego są zniekształcenia sygnału (szumy) wprowadzane przez układ pomiarowy oraz fakt, że drgania maszyn wirnikowych są procesami dynamicznymi słabo okresowymi, złożonymi z procesu zdeterminowanego (najczęściej poliharmonicznego) i zakłóceń o szerokim widmie (tzw. szumu).

Definicję trajektorii okresowej można sformułować analogicznie do sygnałów rzeczywistych (jednowymiarowych) [31]. Trajektorią okresową nazywana jest trajektoria opisana sygnałem dwuwymiarowym z(t) czasu t takim, że istnieje takie T_1 , że dla każdej chwili $z(t+T_1)=z(t)$. Najmniejsza wartość T_1 (większa od zera), dla której spełniony jest powyższy warunek, nazywana jest okresem podstawowym trajektorii.

Okres najczęściej wyrażany jest w jednostce czasu zegarowego. Dla maszyn wirnikowych przydatne, z punktu widzenia diagnostyki technicznej, jest wyrażanie go w krotności obrotów wału lub w jednostkach drogi kątowej wału. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że okres obserwowanej trajektorii może być dłuższy (znacznie dłuższy) od podstawowego okresu wymuszonego przez czas trwania jednego obrotu wału. Przyczyną takiego wzrostu mogą być tzw. ułamkowe składowe widma drgań wału wywołane np. drganiami filmu olejowego w łożysku.

Podczas wyznaczania okresu, gdy trajektoria jest obserwowana na oscyloskopie, wykorzystywany jest znacznik wyróżnionego położenia wału. Znacznik wskazuje wzmocnieniem jasności obrazu (plamką) na ekranie oscyloskopu kolejne obroty wału o kąt 360° (sposób realizacji znacznika opisano w rozdziale 2.8.1). Wówczas liczba jednocześnie obserwowanych plamek na ekranie informuje o okresie trajektorii wyrażonym w krotności obrotów wału.

4.3.2. Zastosowanie funkcji autokorelacji do badania okresowości trajektorii centralnej

Istotą proponowanej metody jest badanie okresowości, a następnie wyznaczenie okresu podstawowego trajektorii przemieszczeń względnych wału, zapisanej w postaci sygnału zespolonego, z wykorzystaniem funkcji autokorelacji.

Niech z(t) jest zespoloną funkcją czasu reprezentującą trajektorię, zdefiniowaną w rozdziale (4.1). Funkcję autokorelacji zmiennej z(t), będącą funkcją opóźnienia czasu r, można przedstawić jako:

$$R_{zz}(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{\tau} \int_{0}^{T} z(t) \cdot z^{*}(t-\tau) dt , \qquad (4-3)$$

gdzie z'(.) jest wielkością sprzężoną z z(.). Ponieważ sygnał z(t) opisuje trajektorię centralną, dla której wartości średnie składowych sygnału są równe zeru, funkcja korelacji jest równa

funkcji kowariancji. Funkcja autokorelacji dla opóźnienia r = 0 osiąga maksimum wartości modułu równe:

$$R_{zz}(0) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{0}^{T} z(t) \cdot z^{*}(t) dt = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{0}^{T} |z(t)|^{2} dt .$$
(4-4)

Używana będzie znormalizowana funkcja autokorelacji odniesiona do wartości autokorelacji $R_{zz}(0)$ dla zerowej wartości opóźnienia $\tau = 0$

$$r_{zz}(\tau) = \frac{R_{zz}(\tau)}{R_{zz}(0)}.$$
 (4-5)

Moduł znormalizowanej funkcji autokorelacji może przybierać wartości z przedziału od 0 do 1.

Radykalne przyśpieszenie wyznaczenia funkcji autokorelacji umożliwia zastosowanie przekształcenia Fouriera. Zgodnie z twierdzeniem [83](o korelacji funkcji zespolonych) autokorelację funkcji zespolonej można wyznaczyć z zależności:

$$R_{zz}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} (Z(f) \cdot Z^*(f)) \cdot \exp(j2\pi f\tau) df , \qquad (4-6)$$

gdzie Z(f) jest transformatą Fouriera sygnału z(t) a $Z^{*}(f)$ wielkością sprzężoną. W pracy wyznaczenia zespolonej transformacji Fouriera oraz odwrotnej transformacji dokonano z zastosowaniem algorytmu szybkiej transformacji Fouriera.

Analiza zmiany części rzeczywistej i urojonej funkcji autokorelacji w funkcji czasu opóźnienia umożliwia ocenę okresowości trajektorii oraz wyznaczenie wartości okresu. Na rys. 4.6 pokazano przykładowy przebieg części rzeczywistej i urojonej oraz modułu i argumentu funkcji autokorelacji sygnału zespolonego opisującego trajektorię.

W przypadku trajektorii z(t) "idealnie" okresowej, o okresie podstawowym równym T_1 , wartości sygnału z(t) i $z(t-T_1)$ są sobie równe (a odpowiadające im punkty na płaszczyźnie zespolonej pokryją się) dla każdego t z przedziału od 0 do T. Oznacza to, że dla przesunięcia czasowego $\tau=T_1$ wyrażenie podcałkowe we wzorze (4-3) jest iloczynem dwu liczb zespolonych, będących liczbami sprzężonymi. Korzystając z własności liczb sprzężonych dla przesunięcia czasu równego okresowi $\tau=T_1$:

- funkcja autokorelacji przyjmuje wartość liczby rzeczywistej (iloczyn liczb sprzężonych jest liczbą rzeczywistą);
- moduł funkcji autokorelacji osiągnie wartość maksymalną (iloczyn liczb sprzężonych przyjmuje wartość kwadratu ich modułu, co oznacza że iloczyn modułów wyrażeń podcałkowych we wzorze (4-3), czyli |z(t)| i $|z'(t T_1)|$ jest najbardziej skorelowany).

Oznacza to, że funkcja autokorelacji dla $\tau=T_1$ osiąga maksimum wartości części rzeczywistej i zarazem maksimum wartości modułu.





Fig. 4.6. Diagrams of real and imaginary parts, absolute value, argument of normalised autocorrelation function estimated for trajectory shown in (Fig. 4.4) as a function of angular distance of the rotor

Podczas analizy dowolnej trajektorii, oceny czy trajektoria jest okresowa, należy dokonywać na podstawie wartości maksimów lokalnych części rzeczywistej znormalizowanej funkcji autokorelacji (powinny być bliskie 1) i odpowiadających im części urojonych (powinny być bliskie 0). W praktyce dobrą estymatę otrzymujemy, gdy rozpatrywany przebieg zawiera dużą liczbę okresów najmniejszej, dominującej częstotliwości.

Alternatywnym rozwiązaniem jest analiza zmiany modułu i argumentu funkcji autokorelacji w funkcji czasu opóźnienia W przypadku analizy trajektorii okresowej, dla przesunięcia czasowego równego okresowi, moduł funkcji autokorelacji osiąga maksimum wartości, a wartość argumentu powinna być równa zeru. Jednak w przypadku analizy trajektorii będących krzywymi płaskimi, posiadającymi oś symetrii, moduł funkcji autokorelacji posiada dodatkowe maksima (o wartości równej modułowi $r_{zz}(T_1)$) dla wartości argumentu różnej od zera. Może to być powodem błędnego określenia okresu trajektorii. Przykładem są wyniki analizy trajektorii o kształcie elipsy (będącej najczęściej spotykanym przypadkiem kształtu trajektorii) pokazane na rys. 4.7.



- Rys. 4.7. Przebiegi wartości części rzeczywistej, modułu i argumentu funkcji autokorelacji trajektorii o kształcie elipsy
- Fig. 4.7. Diagrams of real part, absolute value and argument of normalised autocorrelation function estimated for elliptical trajectory

4.4. Klasyfikacja ksztaltu trajektorii

4.4.1. Pojęcie podobieństwa kształtu trajektorii

W rozdziale opisano metodę umożliwiającą automatyczną klasyfikację badanych trajektorii według ich podobieństwa do wybranych trajektorii wzorcowych, reprezentujących ich klasy kształtu. Do wyznaczania ilościowego podobieństwa trajektorii zastosowano metody korelacyjnej analizy sygnałów.

Podczas porównywania kształtu dwu trajektorii istnieje problem zdefiniowania miary podobieństwa kształtu dwu sygnałów, wynikający z subiektywnego charakteru pojęcia kształtu. Próbę sformułowania kryterium podobieństwa kształtu dwu sygnałów rzeczywistych (jednowymiarowych) stanowi następująca definicja [83]. Dwa sygnały rzeczywiste $x_1(t)$ i $x_2(t)$ mają ten sam kształt, jeżeli istnieją takie liczby rzeczywiste a, b, c, d, że dla każdego tspełniona jest równość:

$$x_2(t) = a \cdot x_1((t-b)/c) + d, \qquad (4.7)$$

Z definicji tej wynika, że kształt sygnału rzeczywistego pozostaje nie zmieniony przy przesunięciu sygnału wzdłuż osi czasu, przesunięciu sygnału wzdłuż osi rzędnych, zmianie skali osi czasu oraz zmianie skali osi rzędnych (rys. 4.8).

Analogicznie można sformułować definicję podobieństwa kształtu dwu sygnałów zespolonych opisujących trajektorie. Dwa sygnały zespolone $z_1(t)$ i $z_2(t)$ mają ten sam kształt, jeżeli istnieją liczby rzeczywiste b, c oraz liczby zespolone a, d takie, że dla każdego t spełniona jest równość:

$$z_2(t) = a \cdot z_1((t-b)/c) + d.$$
(4-8)

Na rys. 4.9 pokazano dwie podobne trajektorie. Wykorzystując kryterium podobieństwa kształtu zakłada się, że dwie trajektorie (dwa sygnały dwuwymiarowe) pokazane powyżej mają identyczny kształt pomimo różnic: wielkości, obrócenia o pewien kąt, przesunięcia o wektor, przesunięcia sygnału wzdłuż osi czasu i zmiany skali osi czasu.



Rys. 4.8. Przykład dwu sygnałów jednowymiarowych (rzeczywistych) o jednakowym kształcie Fig. 4.8. An example of two 1-dimensional (real) signals of identic shape Zdaniem autora badanie kształtu trajektorii powinno uwzględniać fakt, że porównywane trajektorie opisane są sygnałami będącymi funkcjami czasu. Oznacza to, że skala osi czasu powinna być niezmienna (we wzorze (4-8) współczynnik c=1).

Na rys. 2.2 pokazano dwie trajektorie tworzące krzywe o identycznym kształcie. Na wykresach zaznaczono punkty zarejestrowane w równych odstępach czasu. Istnieje wyrażna różnica między przebiegami w funkcji czasu sygnałów opisujących trajektorie, która przejawia się w różnicy rozmieszczenia punktów na krzywych. Oznacza to, że zmiany prędkości punktu obrazującego środek czopa dla porównywanych trajektorii są różne, pomimo że tory, po jakich poruszają się (czyli trajektorie), są identycznymi krzywymi płaskimi. Powoduje to, że hodografy prędkości i przyśpieszenia otrzymane w wyniku analiz obydwu trajektorii będą się znacznie różnić. Zgodnie z powyższymi uwagami dwie trajektorie pokazane na rys. 2.2 nie są podobne, ponieważ położenia punktów odpowiadających kolejnym chwilom czasu są różne.

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.

Opisywane w [51, 52, 73, 96] metody, umożliwiające badanie podobieństwa trajektorii, nie spełniają powyższych założeń.



Rys. 4.9. Dwie trajektorie o jednakowym kształcie Fig. 4.9. Two trajectories of identic shape

4.4.2. Metoda klasyfikacji ksztaltu trajektorii centralnych

Zadaniem klasyfikacji jest przyporządkowanie badanego obiektu (na podstawie przysługujących mu cech) do jednej ze wzorcowych klas. Celem jest opracowanie metody umożliwiającej automatyczną klasyfikację badanych trajektorii według ich podobieństwa do wybranych trajektorii wzorcowych reprezentujących klasy kształtu. Na podstawie relacji diagnostycznych, opisywanych w literaturze, stworzyć można zbiór trajektorii wzorcowych będących reprezentantami klas trajektorii nazywanych w literaturze trajektoriami o kształcie np.: elipsy, ósemki, banana, elipsy z pętlą wewnętrzną itp, odpowiadających określonym zjawiskom zachodzącym w maszynach wirnikowych

Klasyfikacja kształtu trajektorii sprowadza się do porównania badanej trajektorii kolejno ze wszystkimi trajektoriami wzorcowymi i określenia, do której z nich jest ona najbardziej podobna. Dla wybranej trajektorii wynikiem identyfikacji ma być zbiór liczb określających podobieństwo tej trajektorii do poszczególnych trajektorii wzorcowych [92, 93].

Zgodnie z teorią sygnałów podobieństwo dwu sygnałów można badać wykorzystując współczynniki korelacyjne wprowadzone na podstawie iloczynu skalarnego dwu sygnałów. Do wyznaczania ilościowego podobieństwa kształtu trajektorii wykorzystano funkcję korelacji wzajemnej sygnałów zespolonych.

W części pracy dotyczącej identyfikacji kształtu sygnał zespolony, opisujący trajektorię środka czopa, będzie rozpatrywany jako funkcja drogi kątowej wału. Określanie kształtu ma uzasadnienie jedynie dla trajektorii okresowych. Przyjęto, że porównywane trajektorie powinny mieć równe okresy wyrażane w krotności obrotów wału lub jego drodze kątowej. Przyjęcie tych założeń umożliwia porównywanie sygnałów zarejestrowanych przy różnych prędkościach obrotowych wałów maszyny.

4.4.3. Trajektorie wzorcowe

Metoda klasyfikacji kształtu zakłada porównywania badanej trajektorii z trajektoriami wzorcowymi. Przyjęto, że trajektoriami wzorcowymi są, opisywane w literaturze, trajektorie reprezentujące klasy kształtu trajektorii, odpowiadające określonym niesprawnościom maszyn wirnikowych [15,40,64].

Dla potrzeb weryfikacji opracowanej metody wygenerowano trajektorie odpowiadające typowym niesprawnościom maszyn wirnikowych, jakimi są: niewyrównoważenie, nadmierne przeciążenie, pęknięcie wału, wir i bicie olejowe, przycieranie. Wygenerowano trajektorie, które w literaturze określane są jako trajektorie o kształcie: banana, osemki, owalnym z wewnętrzną pętlą, podwójnej osemki itp. Przykłady przedstawiono na rys. 4.12.

Podczas badań maszyn wirnikowych wyposażonych w systemy do stałego nadzoru drganiowego gromadzone często przez wiele lat dane mogą stać się szczególnie cennym źródłem trajektorii wzorcowych. Szczególnie przydatne są trajektorie zarejestrowane dla badanej maszyny podczas jej działania w warunkach określonej niesprawności lub bezpośrednio przed awarią maszyny [39].

Zdaniem autora najlepszym źródłem trajektorii wzorcowych powinny być wyniki komputerowej symulacji działania rzeczywistego obiektu badań w warunkach wystąpienia określonych niesprawności. Przykładem takich trajektorii mogą być wyniki symulacji komputerowej drgań turbiny 13K215 o mocy 200MW [48].

Ze względu na stosowane w pracy cyfrowe techniki analizy sygnałów trajektorie wzorcowe są cyfrowymi sygnałami dwuwymiarowymi w postaci *N*-elementowych ciągów par wartości cyfrowych $\{m[n]=\langle x[n], y[n]\rangle \mid n=0,1,...N-1\}$.

4.4.4. Funkcja korelacji wzajemnej trajektorii

W rozdziale przedstawiono metodę ilościowego oceniania (mierzenia) podobieństwa dwu trajektorii centralnych, wykorzystującą funkcję korelacji wzajemnej i spełniającą następujące kryteria:

- możliwości pełnego sformalizowania metody;
- wynikiem porównania dwu trajektorii ma być jedna liczba stanowiąca ocenę podobieństwa;
- krótki czas obliczeń (możliwość zastosowania algorytmu FFT).

Niech $m(\varphi)$ i $z(\varphi)$ będą zespolonymi reprezentacjami odpowiednio trajektorii wzorcowej i trajektorii badanej, będącymi funkcjami drogi kątowej czopa φ , obserwowanymi na odcinku czasu (drogi kątowej wału) o długości Φ

$$m(\varphi), z(\varphi) : \varphi \in [0, \Phi] . \tag{4-9}$$

Funkcję korelacji wzajemnej dwu zmiennych *m* i *z*, będącą funkcją opóźnienia drogi kątowej *v*, można przedstawić jako:

$$R_{mz}(\upsilon) = \lim_{\Phi \to \infty} \frac{1}{\Phi} \int_{0}^{\Phi} m(\varphi) \cdot z^{*}(\varphi - \upsilon) d\varphi.$$
 (4-10)

Ponieważ sygnały $m(\varphi)$ i $z(\varphi)$ są trajektoriami centralnymi, w których wartości średnie składowych są równe zeru, funkcja korelacji równa jest funkcji kowariancji. Używane będą znormalizowane funkcje korelacji odniesione do wartości autokorelacji funkcji składowych dla zerowej wartości opóźnienia υ

$$r_{mz}(v) = \frac{R_{mz}(v)}{\sqrt{R_{mm}(0) \cdot R_{zz}}(0)}.$$
 (4-11)

Wyznaczanie funkcji korelacji na podstawie definicji (4-10) cyfrowo, jest czasochłonne. Analogicznie do przypadku sygnałów rzeczywistych, do jej wyznaczania można wykorzystać zależność między funkcją korelacji a dwustronnym widmem wzajemnym funkcji zespolonych. Zgodnie z twierdzeniem o korelacji funkcji zespolonych :

$$R_{mz}(\upsilon) = \frac{1}{\Phi} \int_{-\infty}^{+\infty} (\mathcal{M}(f) \cdot Z^*(f)) \cdot \exp(j2\pi f \upsilon) df , \qquad (4-12)$$

gdzie M(f) i Z(f) są transformatami Fouriera $m(\varphi)$ i $z(\varphi)$. Ponieważ rozpatrywane $m(\varphi)$ i $z(\varphi)$ są funkcjami drogi kątowej wału, częstotliwość f ma jednostkę [1/rad]. Funkcja korelacji jest funkcją zespoloną

$$R_{mz}(\upsilon) = |R_{mz}(\upsilon)| \cdot \exp(j \cdot Arg(R_{mz}(\upsilon))), \qquad (4-13)$$

dla której można oddzielnie analizować wartości jej modułu $|R_{mz}(v)|$ oraz argumentu $\operatorname{Arg}(R_{mz}(v))$.



- Rys. 4.10. Dwie trajektorie o identycznym kształcie i różnej wielkości (α- kąt obrotu między trajektoriami) oraz przebiegi części rzeczywistej, modułu i argumentu znormalizowanej funkcji korelacji wzajemnej trajektorii jako funkcje drogi kątowej wału
- Fig. 4.10. Two trajectories of identical shape and different size (α angular displacement between trajectories) and diagrams of real part, absolute value and argument of normalised cross correlation function of trajectories as a function of angular distance of the rotor

Maksymalna wartość modułu znormalizowanej funkcji korelacji wzajemnej (4-11) umożliwia ocenę podobieństwa między trajektoriami. Wartość maksymalna modułu będzie równa jedności wówczas, gdy obie funkcje są przy jakimś przesunięciu $v = \varphi_1$ identyczne dla całego okresu obserwacji.

Argument funkcji korelacji Arg($R_{mz}(\upsilon)$) dostarcza informacji o wzajemnym położeniu porównywanych sygnałów. Umożliwia on wyznaczenie kąta obrotu α między porównywanymi trajektoriami. Kąt ten można wyznaczyć na podstawie argumentu funkcji korelacji dla $\upsilon = \varphi_1$ i jest on równy $\alpha = 2\pi - \text{Arg}(R_{mz}(\varphi_1))$.

Zdaniem autora, ocena podobieństwa trajektorii wymaga dodatkowego sprawdzenia przebiegu wartości argumentu funkcji $u(\varphi)$, zdefiniowanej jako

$$u(\varphi) = m(\varphi) \cdot z^*(\varphi - \varphi_1), \qquad (4-14)$$

będącej funkcją zespoloną drogi kątowej φ . Przy porównywaniu trajektorii o identycznym kształcie, obróconych względem siebie o kąt α , argument funkcji $u(\varphi)$ powinien mieć wartość kąta 2π - α i być stały, niezależnie od wartości φ . Oceną stałości argumentu może być jego odchylenie standardowe.

Na rys. 4.10 pokazano przypadek dwu trajektorii okresowych o identycznym kształcie, ale różniących się położeniem na płaszczyźnie zespolonej (obróconych względem siebie o kąt α). W punkcie, w którym moduł funkcji korelacji osiąga maksimum, wartość argumentu jest równa kątowi α .





Fig. 4.11. Diagrams of absolute value and argument of normalised cross correlation function of trajectory shown in fig. 2.2



- Rys. 4.12. Trajektorie wzorcowe i przebiegi modułów znormalizowanej funkcji korelacji wzajemnej sygnałów wzorcowych z sygnałem pokazanym na rys. 4.4; dla trzeciego wzorca przedstawiono również argument funkcji korelacji
- Fig. 4.12. Pattern trajectories and diagrams of absolute value of normalised cross correlation function of trajectories and trajectory shown in fig. 4.4; for third pattern trajectory shown a diagram of cross correlation function argument

Rysunek 4.11 przedstawia wynik porównania dwu trajektorii, pokazanych na rys. 2.2. Trajektorie te tworzą identyczne krzywe płaskie, ale odpowiadające im trajektorie drugiego i trzeciego rzędu (hodografy prędkości i przyśpieszenia) obydwu trajektorii znacznie się różnią. Wynikiem analizy są przebiegi modułu znormalizowanych funkcji korelacji wzajemnej. Mała wartość maksymalnej wartości modułu, będącej miarą podobieństwa, wskazuje na małe podobieństwo badanych trajektorii.

Rysunek 4.12 przedstawia porównanie trajektorii pokazanej na rys. 4.4 z trzema trajektoriami wzorcowymi o kształcie elipsy, ósemki i kształcie owalnym z wewnętrzną pętlą. Wynikiem analizy są przebiegi modułu znormalizowanych funkcji korelacji wzajemnej. Dla badanej trajektorii wynikiem identyfikacji jej kształtu jest zbiór trzech liczb określających podobieństwo tej trajektorii do trajektorii wzorcowych. Liczby te są maksymalnymi wartościami modułów znormalizowanych funkcji korelacji wzajemnej.

4.4.5. Interpretacja funkcji korelacji wzajemnej

Funkcje $m(\varphi)$ i $z(\varphi)$ są funkcjami zespolonymi zmiennej rzeczywistej φ , będącej drogą kątową wału. Można je przedstawić w postaci $m(\varphi) = |m(\varphi)| \cdot \exp(j \cdot \beta_m(\varphi))$ i $z(\varphi) = |z(\varphi)| \cdot \exp(j \cdot \beta_z(\varphi))$, gdzie β_m i β_z są argumentami funkcji $m(\varphi)$ i $z(\varphi)$. Wówczas wzór opisujący korelację wzajemną sygnałów zespolonych (4-10) przybiera postać:

$$R_{mz}(\upsilon) = \lim_{\Phi \to \infty} \frac{1}{\Phi} \int_{0}^{\Phi} |m(\varphi)| \cdot |z^{*}(\varphi - \upsilon)| \cdot \exp(j(\beta_{m}(\varphi) + \beta_{z*}(\varphi - \upsilon))) d\varphi.$$
(4-15)

Rozważony zostanie przypadek dwu trajektorii (sygnałów zespolonych) okresowych, pokazanych na rys. 4.13, o identycznym kształcie, ale różniących się położeniem na plaszczyźnie zespolonej i wielkością. Trajektoria $z(\varphi)$ jest obrócona względem $m(\varphi)$ o kąt α wokół środka układu współrzędnych. Kąt α jest kątem skierowanym i ma wartość dodatnią w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara (odmierzany jest od osi liczb rzeczywistych w kierunku osi liczb urojonych).

Dla przesunięcia czasowego $\upsilon = \varphi_1$ dobranego tak, że wszystkie punkty sygnałów $m(\varphi)$ i $z(\varphi - \varphi_1)$ są odpowiadającymi sobie punktami, dla każdego φ z przedziału od 0 do Φ , na płaszczyźnie zespolonej, odpowiadające sobie punkty krzywych są obrócone względem siebie o kąt α (rys. 4.13). Powoduje to, że argumenty funkcji $z(\varphi - \varphi_1)$ przyjmują wartości:

$$\beta_{2}(\varphi - \varphi_{1}) = \beta_{m}(\varphi) + \alpha. \qquad (4-16)$$

Wówczas we wzorze (4-15) argument wyrażenia podcałkowego przyjmuje wartość:

$$\beta_{\rm m}(\varphi) + \beta_2 (\varphi - \varphi_1) = 2 \cdot \pi - \alpha$$
 (4-17)

Wzór (4-15) dla przesunięcia φ_1 przyjmuje postać:

$$R_{mz}(\varphi_1) = \lim_{\Phi \to \infty} \frac{1}{\Phi} \int_0^{\Phi} |m(\varphi)| \cdot |z(\varphi - \varphi_1)| \cdot \exp(j \cdot (2\pi - \alpha)) d\varphi .$$
(4-18)

Z (4-18) wynika, że dla przesunięcia czasowego $v = \varphi_1$ argument wyrażenia podcałkowego jest stały i równy 2π - α dla każdej wartości φ . Powoduje to, że:

• Argument funkcji korelacji wzajemnej dla $\upsilon = \varphi_1$ jest równy $2\pi - \alpha$, $\alpha = 2\pi - \operatorname{Arg}(R_{mz}(\varphi_1))$.

- Funkcja autokorelacji uzyska maksimum wartości modułu dla $v = \varphi_1$, ponieważ:
 - moduł funkcji korelacji jest równy sumie arytmetycznej modułów wyrażeń podcałkowych;
 - •suma iloczynów $|m(\varphi)| \cdot |z(\varphi-\varphi_1)|$ osiąga maksimum, ponieważ dla $\upsilon=\varphi_1$ wartości modułów $m(\varphi)$ i $z(\varphi-\varphi_1)$ są najbardziej skorelowane.

Wnioski

W celu określenia, czy trajektorie są podobne, należy analizować wartości modułu funkcji korelacji wzajemnej w funkcji opóźnienia. Podczas badania trajektorii podobnych, dla odpowiedniego opóźnienia czasowego, moduł funkcji autokorelacji osiąga maksimum wartości. Z kolei wartość argumentu powinna być równa ujemnej wartości kąta obrotu między trajektoriami.

Analizując trajektorie obrócone względem siebie zauważa się, że analiza przebiegów części rzeczywistej i urojonej funkcji korelacji wzajemnej nie daje możliwości oceny podobieństwa sygnałów.




Najczęściej wartość opóźnienia czasowego φ_1 nie wnosi żadnej informacji i wynika z różnicy między chwilami rozpoczęcia rejestracji porównywanych trajektorii. Wartość opóźnienia czasowego φ_1 staje się 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 wartości czasu "makro" θ .

4.5. Analiza trajektorii w dziedzinie częstotliwości

4.5.1. Przyjęty sposób analizy trajektorii w dziedzinie częstotliwości

Stosowana technika analizy częstotliwościowej trajektorii

Sygnały przemieszczeń względnych, otrzymane z dwu czujników o osiach wzajemnie prostopadłych, mogą być poddawane analizie częstotliwościowej jako:

- dwa sygnały jednowymiarowe, opisujące przemieszczenia czopa w kierunku promieniowym, będące sygnałami składowymi trajektorii;
- jeden sygnał dwuwymiarowy, opisujący przemieszczenia czopa w płaszczyźnie promieniowej.

W rozdz. 3.2 opisano stosowaną obecnie analizę częstotliwościową sygnałów składowych trajektorii, zarejestrowanych niezależnie w dwu kierunkach pomiarowych (będących sygnałami rzeczywistymi). Ze względu na charakter analizowanych sygnałów wynikiem analiz są głównie jednostronne widma gęstości mocy. Analizy są wykonywane z wykorzystaniem standardowych analizatorów sygnałów.

Obecnie analiza częstotliwościowa trajektorii sprowadza się jedynie do obserwacji wybranych składowych częstotliwościowych, odpowiadających wąskim pasmom częstotliwości sygnału. W rozdz. 3.3.3 opisano stosowaną metodę z wykorzystaniem układu dwóch filtrów wąskopasmowych, środkowoprzepustowych, umożliwiającą prowadzenie takiej analizy.

Wadą opisanej metody jest konieczność stosowania specjalnego układu aparatury oraz ograniczenie analiz jedynie do niewielkiej liczby (z góry określonych) składowych częstotliwościowych, najczęściej o częstotliwości obrotów wirnika oraz kilku kolejnych harmonicznych. Identyfikacja otrzymanych tą metodą cech składowych częstotliwościowych trajektorii dokonywana jest najczęściej przez osobę prowadzącą analizę w wyniku ich obserwacji na ekranie np. oscyloskopu.

Przyjęty sposób analizy częstotliwościowej

Ze względu na ograniczone możliwości zastosowania dostępnych obecnie metod zaproponowano metodę analizy częstotliwościowej, bazującej na modelu, w którym trajektoria jest zapisana w postaci sygnału zespolonego.

Zgodnie z rozdz. 2.2 chwilowe wartości sygnałów składowych opisujących trajektorię odpowiadają współrzędnym punktów w prostokątnym układzie współrzędnych. W układzie tym dowolny punkt może być opisany poprzez wektor zaczepiony w początku układu współrzędnych i końcu zaczepionym w punkcie. Zgodnie z powyższym można przyjąć, że trajektoria opisana jest zmiennym w czasie wektorem na płaszczyźnie. Wektor ten wiruje wokół środka układu współrzędnych. Oznacza to, że analiza częstotliwościowa trajektorii może być rozpatrywana jako analiza częstotliwościowa zmian wektora wirującego wokół środka układu współrzędnych.

Przyjęto założenie, że osie prostokątnego układu współrzędnych odpowiadają wzajemnie prostopadłym osiom czujników. Sygnały składowe trajektorii, opisujące przemieszczenia w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach, odpowiadają rzutom wektora opisującego trajektorię na osie układu współrzędnych. Oznacza to, że analiza częstotliwościowa sygnału składowego (czyli sygnału przemieszczeń zarejestrowanego jednym czujnikiem) jest analizą rzutu prostokątnego wirującego wektora na jedną z osi układu współrzędnych (będącą osią tego czujnika).

Wykorzystując istnienie wzajemnej jednoznacznej odpowiedniości między uporządkowanymi parami współrzędnych kartezjańskich punktów a liczbami zespolonymi, płaszczyznę, w której opisywana jest trajektoria, można rozpatrywać jako płaszczyznę zespoloną. Wówczas trajektorię można zapisać jako jednowymiarowy sygnał zespolony zmiennej rzeczywistej, co zostało opisane w rozdz. 4.1. Pozwala to na bezpośrednie zastosowanie przekształcenia Fouriera sygnału zespolonego.

Sygnały wibroakustyczne, emitowane przez maszynę wirnikową obserwowaną w ustalonych warunkach działania, są realizacją stacjonarnego procesu stochastycznego. Powoduje to, że najbardziej przydatną cechą trajektorii w dziedzinie częstotliwości jest gęstość widmowa mocy. Opierając się na wynikach przekształcenia Fouriera, w postaci zespolonego widma sygnału zespolonego, w rozdz. 4.5.4 rozpatrzono dwustronną i jednostronną gęstość widmową mocy sygnału zespolonego opisującego trajektorię. Zaproponowana metoda daje pełny opis trajektorii w dziedzinie częstotliwości, a dzięki możliwości bezpośredniego zastosowania algorytmu szybkiego przekształcenia Fouriera (FFT) wymaga krótkiego czasu obliczeń.

Przed wprowadzeniem wspomnianych cech trajektorii w rozdz. 4.5.2 omówiono zespolone widmo sygnału zespolonego, będące wynikiem przekształcenia Fouriera oraz jego geometryczną interpretację.

4.5.2. Transformacja Fouriera sygnału zespolonego

Transformacja Fouriera jest podstawą analizy częstotliwościowej sygnałów. Obecnie w praktyce stosowane są cztery podstawowe typy tego przekształcenia. Różnice pomiędzy nimi wynikają z faktu, iż przekształcenia dokonuje się na zmiennych określonych w różnie zdefiniowanych przedziałach i posiadających różne własności w dziedzinie czasu i częstotliwości. Poniżej pokazano przykład transformacji Fouriera umożliwiającej przedstawienie okresowego sygnału zespolonego w postaci szeregu Fouriera. Wyboru dokonano ze względu na możliwość interpretacji wyrazów otrzymanego szeregu jąko wektorów.

Stacjonarną trajektorię centralną (rozdz.4.2.5) ruchu czopa w łożysku, zapisaną zgodnie z rozdz. 4.1 jako funkcję zespoloną z(t) o okresie T, można przedstawić w postaci szeregu Fouriera [83]:

$$z(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} Z[f_k] \exp(j2\pi f_k t).$$
 (4-19)

Współczynniki Z[fk] określane są jako:

$$Z[f_k] = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} z(t) \exp(-j2\pi f_k t) dt, \qquad (4-20)$$

gdzie $f_k = k \cdot \Delta f$ oraz częstotliwość $\Delta f = 1/T$ nazywana jest częstotliwością podstawową.

Ciągły sygnał zespolony o czasie trwania T transformowany jest w szereg wartości $\{Z[f_k] \mid -\infty < k < +\infty\}$, nazywany widmem zespolonym. Wartości widma są określone dla dyskretnych częstotliwości f_k . Wartości $Z[f_k]$ są liczbami zespolonymi.



Rys. 4.14. Przykład zespolonego widma sygnału zespolonego pokazanego w postaci wykresu trójwymiarowego

Fig. 4.14. An example of 3-dimensional representation of the complex spectrum of complex signal

Przykład zespolonego widma sygnału zespolonego w postaci wykresu trójwymiarowego pokazano na rys. 4.14. Widmo to w odróżnieniu od widma sygnału rzeczywistego nie jest symetryczne względem środka układu współrzędnych (rys. 4.15).

Analogicznie do przypadku sygnałów rzeczywistych na podstawie widma zespolonego tworzone jest widmo amplitudowo-fazowe, przedstawiające wartości amplitud i faz początkowych poszczególnych składowych częstotliwościowych sygnału zespolonego.

Szereg wartości { $Z[f_k] \mid -\infty < f_k < \infty$ } jest dyskretnym zespolonym widmem okresowego sygnału zespolonego z(t). Wyrazy $Z[f_k]$ będące liczbami zespolonymi można przedstawić w postaci:

$$Z[f_k] = |Z[f_k]| \exp(j\Phi[f_k]) = A[f_k] \exp(j\Phi[f_k]).$$
(4-21)

Szereg wartości $\{A[f_k] \mid -\infty < f_k < \infty\}$ i $\{\Phi[f_k] \mid -\infty < f_k < \infty\}$ nazywa się dyskretnym widmem amplitudowym i fazowym okresowego sygnału zespolonego z(t). Pomiędzy widmami zachodzą następujące związki:

$$A[f_k] = |Z[f_k]|, (4-22)$$

$$\cos \Phi[f_k] = \frac{\operatorname{Re}(Z[f_k])}{|Z[f_k]} , \quad \sin \Phi[f_k] = \frac{\operatorname{Im}(Z[f_k])}{|Z[f_k]}. \quad (4-23)$$



Rys. 4.15. Widma zespolone będące wynikiem transformaty Fouriera sygnału :
 a - rzeczywistego; część rzeczywista jest funkcją parzystą, a urojona nieparzystą, b - zespolonego; brak symetrii wyników transformaty
 Fig. 4.15. Complex exectants being results of Fourier Transform; a of real signal (real part of Fourier Transform; a) of real signal (real part of Fourier Transform; b) of real signal (real part of Fourier Transform;

Fig. 4.15. Complex spectrums being results of Fourier Transform: a - of real signal (real part is even and imaginary part is odd), b - of complex signal (spectrum is not symmetrical)

Widma amplitudowe i fazowe stanowią pełny opis sygnału z(t) w dziedzinie częstotliwości. Ich stosowanie do analizy sygnałów zespolonych opisujących trajektorię wymaga przyjęcia

założenia, że analizowana trajektoria jest poliharmoniczna, co bardzo ogranicza ich zastosowanie.

Ważnym zagadnieniem, dotychczas nie poruszonym, jest problem realizowalności transformacji Fouriera sygnału zespolonego. U podstaw teorii przekształcenia Fouriera leżą dwa zagadnienia. Pierwsze dotyczy ustalenia zakresu stosowalności wzoru (4-20), a więc sformułowania warunków, jakie powinien spełniać sygnał zespolony (trajektoria), aby całka Fouriera istniała dla rozpatrywanego zakresu częstotliwości. Drugi dotyczy wzajemnej jednoznaczności przekształceń Fouriera (4-19) i (4-20).

Powszechnie przyjmuje się, że sygnały rzeczywiste realizowalne fizycznie spełniają warunki transformowalności. Na podstawie [83] rozważania dotyczące przekształcenia Fouriera są słuszne również w odniesieniu do sygnałów zespolonych, jeżeli część urojona i rzeczywista sygnału spełniają warunki transformowalności sformułowane dla sygnałów rzeczywistych.

4.5.3. Geometryczna interpretacja widma sygnalu zespolonego

Poniżej omówiono geometryczną interpretację widma sygnału zespolonego, opisującego trajektorię, rozpatrywaną na płaszczyźnie zespolonej.

Zgodnie ze wzorem (4-20) trajektorię zapisaną w postaci sygnału zespolonego można przedstawić jako sumę nieskończonej liczby elementów $Z[f_k] \exp(j2\pi f_k t)$, nazywanych składowymi widma. We wzorze (4-20) częstotliwość f_k jest częstotliwością składowej widma i może przyjmować wartości dodatnie lub ujemne. Dla chwili czasu t = 0 składowe ze wzoru (4-20) sprowadzają się do $Z[f_k]$. Na płaszczyźnie zespolonej liczbie (punktowi) $Z[f_k] = \text{Re } Z[f_k]$ + jIm $Z[f_k]$ przypisać można wektor (wodzący punktu), (rys. 4.16). Początkowe położenie na płaszczyźnie zespolonej wektora $Z[f_k]$ (odpowiadające chwili czasu t=0) określa kąt Φ_k nazywany fazą początkową składowej widma. Mnożenie tego wektora przez exp ($j2\pi f_k t$), gdzie $2\pi f_k$ jest częstością kątową ω_k , odpowiada jego obrotowi o kąt $\phi_k = \omega_k \cdot t$. W przypadku gdy częstotliwość f_k ma wartość dodatnią, częstość kątowa ma również wartość dodatnią, co odpowiada kierunkowi obrotu w lewo (przeciwnie do ruchu wskazówek zegara). Gdy częstotliwość f_k ma wartość ujemną, kierunek obrotu składowej widma jest przeciwny.

Podsumowując, składowym widma zespolonego na płaszczyźnie zespolonej odpowiadają wektory o stałej długości, równej modułowi składowej, zaczepione w początku układu współrzędnych i wirujące ze stałą prędkością kątową (rys. 4.16) [76, 80, 81]. Trudne do zinterpretowania w przypadku analizy sygnałów rzeczywistych składowe widma o ujemnej częstotliwości, w przypadku analizy sygnałów zespolonych opisujących trajektorię, są wektorami o kierunku obrotu przeciwnym do ruchu wskazówek zegara.

Zgodnie z rozdz. 4.5.1 można przyjąć, że trajektorię opisuje zmienny w czasie wektor wirujący wokół środka układu współrzędnych. Widmo zespolone, będące wynikiem analizy trajektorii zapisanej w postaci sygnału zespolonego, jest sumą (nieskończonej liczby) składowych



- Rys. 4.16. Geometryczna interpretacja składowych widma sygnału dwuwymiarowego jako wirujących wektorów
- Fig. 4. 16. Geometrical interpretation of complex signal spectrum components as rotating vectors

częstotliwościowych, którym odpowiadają wektory (o stałej długości) zaczepione w początku układu współrzędnych i wirujące ze stałą prędkością kątową. Oznacza to, że analiza częstotliwościowa trajektorii może być rozpatrywana jako przekształcenie wektora wirującego (o zmiennej długości i prędkości kątowej) w równoważną mu sumę wirujących wektorów składowych (z których każdy ma stałą długość i prędkość kątową) [91].

Geometryczna interpretacja widma sygnału rzeczywistego

Poniżej przedstawiona zostanie geometryczna interpretacja widma sygnału jednowymiarowego (rzeczywistego), rozpatrywanego na płaszczyźnie zespolonej. Celem jest pokazanie, że jest ono szczególnym przypadkiem widma sygnału zespolonego.

Wynikiem transformacji Fouriera sygnału rzeczywistego jest widmo zespolone sygnału rzeczywistego. Własności transformaty dla sygnału rzeczywistego powodują [67], że odpowiadające sobie składowe widma o częstotliwości dodatniej i ujemnej są liczbami sprzężonymi

$$Z(-f) = (Z(f))^{\bullet}.$$
 (4-24)

Część rzeczywista widma funkcji rzeczywistej jest funkcją parzystą, natomiast część urojona funkcją nieparzystą (rys. 4.15).

Dwóm składowym widma zespolonego sygnału rzeczywistego o częstotliwości plus f i minus f odpowiada para wektorów zaczepionych w początku układu współrzędnych i wirujących wokół niego z jednakowymi co do wartości bezwzględnej prędkościami kątowymi $\omega = 2\pi f$, ale o przeciwnych kierunkach obrotu. Ponieważ rozpatrywane składowe widma są liczbami zespolonymi sprzężonymi, suma tych dwu wektorów, wyznaczona dla dowolnej chwili czasu, tworzy wektor leżący na osi liczb rzeczywistych, będący liczbą rzeczywistą (rys. 4.17). Wykres chwilowych długości tego wektora w funkcji czasu tworzy sinusoidę.



- Rys. 4.17. Geometryczna interpretacja składowych widma sygnału rzeczywistego jako wirujących wektorów [76]
- Fig. 4. 17. Geometrical interpretation of real signal spectrum components as rotating vectors [76]

4.5.4. Gęstości widmowe

Wynikiem analizy częstotliwościowej stacjonarnej trajektorii stochastycznej zapisanej w postaci sygnału zespolonego jest zdefiniowana poniżej gęstość widmowa sygnału zespolonego. W pracy gęstość widmowa sygnału zespolonego, opisującego trajektorię, nazywana będzie gęstością widmową trajektorii.

Definicja gęstości widmowej trajektorii za pomocą transformacji Fouriera

Trajektoria losowa zapisana w postaci sygnału zespolonego z(t) jest opisana zbiorem realizacji (funkcji losowych) { $z_{\alpha}(t) \mid \alpha \in \Gamma$ }, gdzie α przyjmuje wartości ze zbioru Γ . Niech $z_{\alpha}(t)$ jest α -tą realizacją zespolonego ergodycznego sygnału losowego z(t) o czasie trwania T. Wynikiem skończonego przekształcenia Fouriera tej realizacji jest $Z_{\alpha}(f,T)$. Poniżej (analogicznie do gęstości widmowej sygnału rzeczywistego) zdefiniowano dwustronną i jednostronną gęstość widmową sygnału zespolonego opisującego trajektorię.

Dwustronna gęstość widmowa sygnału zespolonego

Dwustronną gęstość widmową sygnału z(t) określić można następująco:

$$S_{zz}(f) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} E\left\{ \left| Z_{\alpha}(f,T) \right|^2 \middle| \alpha \in \Gamma \right\},\tag{4-25}$$

gdzie E{.} jest operatorem wartości oczekiwanej w zbiorze realizacji, których zbiorem indeksów jest Γ . Częstotliwość f przybiera wartości z przedziału (- ∞ , + ∞).

Jednostronna gęstość widmowa sygnału zespolonego

Analogicznie do sygnałów rzeczywistych zostanie zdefiniowana jednostronna gęstość widmowa. Jednostronną gęstość widmową sygnału z(1) okr ślić można następująco:

$$G_{zz}(f) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} E\{ |Z_{\alpha}(f,T)|^{2} + |Z_{\alpha}(-f,T)|^{2} | \alpha \in \Gamma \}$$
(4-26)

lub stosując inny zapis

$$G_{zz}(f) = S_{zz}(f) + S_{zz}(-f), \qquad (4-27)$$

gdzie częstotliwość f przybiera wartości z przedziału (0, +∞).

Gęstości widmowe sygnałów rzeczywistych (jednowymiarowych) i zespolonych różnią się. Wykorzystywanym wynikiem analizy sygnałów rzeczywistych jest jedynie jednostronna gęstość widmowa mocy $G_{zz}(f)$ (w większości pozycji literaturowych słowo "jednostronna" jest pomijane). Dwustronna gęstość widmowa sygnałów rzeczywistych $S_{zz}(f)$ nie jest praktycznie stosowana, ponieważ z własności transformacji Fouriera sygnałów rzeczywistych wynika, że $S_{zz}(f)$ jest funkcją parzystą. Powoduje to, że część dwustronnej gęstości widmowej sygnału rzeczywistego, odpowiadająca ujemnym częstotliwościom, jest powtórzeniem informacji zawartych w części o dodatnich częstotliwościach. Dodatkową trudnością jest brak fizycznej interpretacji ujemnych częstotliwości.

W przypadku analizy sygnałów zespolonych opisujących trajektorie, wartości gęstości widmowej dla ujemnych i dodatnich częstotliwości są różne. Dla sygnałów zespolonych część dwustronnej gęstości widmowej dla ujemnych częstotliwości wnosi dodatkowe informacje.

Określanie gęstości widmowej za pomocą filtracji analogowej

Obecnie w diagnostyce technicznej maszyn analiza częstotliwościowa sygnałów niemał wyłącznie prowadzona jest z wykorzystaniem techniki cyfrowej. Również w pracy nie zakłada się stosowania analiz technikami analogowymi. Poniżej opisano jednostronną gęstość widmową sygnału dwuwymiarowego, opisującego trajektorię określoną w rozdz. 2.2, wyznaczaną techniką analogowej filtracji wąskopasmowej. Opis ten wprowadzono, ponieważ zdaniem autora, zastosowana definicja wprowadza bardzo intuicyjne określenie gęstości widmowej mocy sygnału opisującego trajektorię.



- Rys. 4.18. Schemat blokowy analizatora umożliwiającego estymację jednostronnej gęstości widmowej sygnału dwuwymiarowego, opisującego trajektorię
- Fig. 4.18. Block diagram of signal analyser for 1-sided power spectral density of two-dimensional signal describing the trajectory

Jednostronną gęstość widmową sygnału dwuwymiarowego $s(t) = \langle x(t), y(t) \rangle$, będącego uporządkowaną parą sygnałów przemieszczeń x(t) i y(t) zarejestrowanych w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach, można zdefiniować:

$$G_{ss}(f) = \lim_{T \to \infty, \Delta f \to 0} \frac{1}{T \Delta f} \int_{0}^{T} |s(t, \Delta f, f)|^2 dt, \qquad (4-28)$$

gdzie $|s(t, f, \Delta f|$ stanowi moduł części sygnału s(t) zawartego w paśmie częstotliwości o szerokości Δf położonym wokół częstotliwości f.

Schemat blokowy analizatora umożliwiającego estymację jednostronnej gęstości widmowej pokazano na rys. 4.18. Zasada działania jest następująca : realizacje x(t) i y(t) jednowymiarowych sygnałów składowych analizowanej trajektorii losowej przechodzą przez wąskopasmowe filtry o szerokości pasma Δf oraz częstotliwości środkowej f (która może być zmieniana). Realizacje sygnałów wyjściowych $x(f, \Delta f, t)$ i $y(f, \Delta f, t)$ są podnoszone do kwadratu, dodawane i uśredniane w czasie, a następnie dzielone przez szerokość pasma Δf . W wyniku otrzymuje się estymator jednostronnej gęstości widmowej sygnału dwuwymiarowego

$$\widetilde{G}_{ss}(f) = \frac{1}{T\Delta f} \int_{0}^{T} (x^{2}(t,\Delta f, f) + y^{2}(t,\Delta f, f)) dt .$$
(4-29)

4.5.5. Estymacja gęstości widmowej techniką cyfrową

W pracy zastosowano metodę wyznaczania gęstości widmowej sygnału zespolonego opisującego trajektorię, polegającą na bezpośrednim obliczeniu szukanych ocen na podstawie wartości transformat Fouriera. Wykorzystując zależność (4-25), zgrubny estymator dwustronnej gęstości widmowej mocy sygnału z(t) dla wycinka jego realizacji o długości T można określić jako:

$$\widetilde{S}_{zz}(f) = \frac{1}{T} \left| Z(f,T) \right|^2, \qquad (4-30)$$

gdzie Z(f,T) jest transformatą Fouriera realizacji z(t) sygnału losowego obserwowanego w przedziale czasu o długości T, a częstotliwość f przyjmuje wartości ujemne i dodatnie. Estymator jednostronnej gęstości widmowej można określić jako:

$$\bar{G}_{zz}(f) = \bar{S}_{zz}(f) + \bar{S}_{zz}(-f).$$
 (4-31)

W pracy do analizy trajektorii stosowane są techniki cyfrowe, których podstawą analizy częstotliwościowej jest dyskretna transformacja Fouriera (DFT).

Trajektorię określoną przez ciąg N par wartości chwilowych zapisano zgodnie z rozdz. 4.1 jako ciąg liczb zespolonych $\{z_n \mid n = -N/2, \dots, N/2-1\}$, gdzie n jest numerem próbki sygnału dyskretnego. Wartości sygnału dyskretnego są określone w chwilach czasu $t_n = n \Delta t$. Dyskretne zespolone przekształcenie Fouriera jest przekształceniem jednoznacznym ciągu złożonego

z liczb zespolonych $\{z_n\}$ w inny ciąg liczb zespolonych, nazywany zespolonym widmem sygnału okresowego $\{Z_k\}$

$$Z_{k} = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \exp(-j2\pi kn/N).$$
(4-32)

Wartości widma są określane dla dyskretnych częstotliwości $\{f_k = k \Delta f \mid -N/2 \le k \le N/2-1\}$, gdzie: k - jest numerem dyskretnej częstotliwości, $\Delta f = f_s/N$ jest rozdzielczością częstotliwościowa, f_s - częstotliwością próbkowania. Dyskretne odwrotne przekształcenie Fouriera można zapisać w postaci:

$$z_n = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \sum_{k=-N/2} \exp(j2\pi kn/N).$$
 (4-33)

Możliwy jest zapis DFT, odstępujący od symetrycznego sposobu zapisywania wartości próbek sygnału i widma tego sygnału, korzystający z okresowości stosowanego okna czasowego. Indeksy $n \ge (N/2)$ oraz $k \ge (N/2)$ odpowiednio reprezentują tę część sygnału dyskretnego, która odpowiada połowie okresu T położonej z lewej strony osi czasu (dla t < 0) oraz tę część widma, która odpowiada ujemnym częstotliwościom (dla f < 0). Dla tak przyjętego sposobu zapisu wzory (4-32) i (4-33) przyjmują postać:

$$Z_{k} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-j2\pi kn/N), \qquad (4-34)$$

$$z_n = \sum_{k=0}^{N-1} Z_k \exp(j2\pi kn/N), \qquad (4-35)$$

przy czym n, k = 0, 1, ..., N-1.

Wzory te określają dyskretną transformację Fouriera i odwrotną dyskretną transformację Fouriera, do których obliczania można zastosować bezpośrednio algorytm szybkiej transformacji Fouriera (FFT), umożliwiający znaczną redukcję liczby działań arytmetycznych koniecznych do uzyskania wyniku.

Stosując technikę cyfrową wyznaczania transformacji Fouriera z wykorzystaniem DFT, określony wzorem (4-30) zgrubny estymator dwustronnej gęstości widmowej mocy dyskretnego szeregu czasowego $\{z_n\}$, o długości N, można określić jako:

$$\widetilde{S}_{zz}[f_k] = \frac{\Delta t}{N} |Z_k|^2, \qquad (4-36)$$

gdzie Z_k jest dyskretną transformacją Fouriera szeregu czasowego zgodnie z (4-32). Algorytm wyznaczania gęstości widmowych opisano w dodatku F. Do ich wyznaczania wykorzystany jest algorytm FFT realizujący DFT przedstawioną zgodnie z (4-34) i (4-35).

Podczas stosowania technik cyfrowych należy przeprowadzić optymalizację algorytmów oraz warunków analizy w celu zrównoważenia wymagań związanych z :

- ograniczaniem zniekształceń wyznaczanych widm, spowodowanych tzw. przeciekiem składowych widm i zależnych od postaci przyjmowanego okna w dziedzinie czasu;
- oczekiwaną rozdzielczością częstotliwościową widma zależną od parametrów próbkowania oraz od postaci okna w dziedzinie czasu;
- niezbędnym uśrednianiem (w dziedzinie czasu lub częstotliwości) w celu ograniczenia wpływu składowych losowych, zawartych w sygnale.

4.5.6. Przyjęty model trajektorii w dziedzinie częstotliwości

Zadaniem analizy częstotliwościowej jest badanie właściwości sygnału poprzez analizę jego struktury częstotliwościowej (analizę widma sygnału). Pojęciu "sygnał" przyporządkowuje się pewne abstrakcyjne modele, które umożliwiają opis i analizę zjawisk, obserwowanych za pośrednictwem sygnału [7]. Analiza częstotliwościowa trajektorii ruchu środka czopa względem panewki łożyska powinna umożliwiać wyznaczanie cech sygnału istotnych z punktu widzenia przyjmowanych modeli drgań wału w maszynie wirnikowej w płaszczyźnie promieniowej.

Ruch wirnika w płaszczyźnie prostopadłej do osi jest skutkiem wielu wymuszeń (niesprawności) maszyny wirnikowej [54]. Analiza procesów dynamicznych, jakimi są drgania w maszynach o stacjonarnym ruchu okresowym, wykazuje, że procesy te można uznać za słabo okresowe. Złożone są one z procesu zdeterminowanego - najczęściej poliharmonicznego i zakłóceń o szerokim widmie- tzw. szumu.

Dokładna analiza widmowa tych procesów potwierdza ten wniosek. Na rys. 4.19 pokazano przykład wyników analizy częstotliwościowej trajektorii zarejestrowanej w warunkach technicznych. Wykresy gęstości widmowych mocy sygnału składają się ze składowej ciągłej o małej mocy i dyskretnych pików o dużej mocy. Pozwala to przyjąć, że w sygnale są obecne dominujące składowe zdeterminowane, harmoniczne na tle szerokopasmowego szumu.

W większości przypadków trajektorii otrzymywanych podczas badań maszyn wirnikowych można przyjąć założenie, że są one trajektoriami słabo okresowymi (rozdz. 4.2.3). W widmie dominują składowe o częstotliwości podstawowej związanej z częstotliwością obrotów wirnika oraz szeregu liniowo zależnych wyższych lub niższych harmonicznych. Przyjęcie takiego założenia pozwala interpretować dominujące składowe widma gęstości mocy analogicznie do składowych widma amplitudowego.

W celu określenia amplitudy dominujących składowych częstotliwościowych wprowadzono zastępcze widmo amplitudowe sygnału zespolonego, opisującego trajektorię. Zastępcze widmo amplitudowe określane jest tylko dla wybranych składowych o dominujących wartościach lub dla składowych o określonych częstotliwościach, najczęściej będących superharmonicznymi i subharmonicznymi częstotliwości obrotów wirnika. Wartość składowej o częstotliwości f zastępczego widma amplitudowego wyznaczana jest na podstawie widma gęstości mocy sygnału ze wzoru

$$A_{zz}(f) = \left(\int_{f=0.5B}^{f+0.5B} (S_{zz}(f)df)\right)^{0.5},$$
(4-37)

gdzie *B* jest szerokością uwzględnianego przedziału (wyrażoną w [Hz]), której wartość przyjmowana jest w zależności od zastosowanego okna widmowego do wyznaczania $S_{zz}(f)$ i rozdzielczości częstotliwościowej widma.







Rys. 4.20. Zastępcze dwustronne widmo amplitudowe sygnału zespolonego, opisującego trajektorię, wyznaczone na podstawie dwustronnej gęstości widmowej, pokazanej na rys. 4.19

Fig. 4.20. An example of equivalent 2-sided amplitude spectrum of complex signal which describe the trajectory estimated with 2-sided power spectral density, shown in fig. 4.19

W przypadku gdy gęstość widmowa mocy sygnału jest funkcją dyskretną, wartość składowej o częstotliwości f_k zastępczego widma amplitudowego wyznaczana jest ze wzoru:

$$A_{zz}[f_k] = \left(\sum_{i=k-b}^{k+b} (S_{zz}[f_i] \cdot \Delta f)\right)^{0.5},$$
(4-38)

gdzie b liczbą całkowitą. Na rys. 4.20 pokazano przykład zastępczego widma amplitudowego.

4.6. Zwrot kierunku obrotu punktu na trajektorii

Na płaszczyźnie prostokątnego układu współrzędnych zwrot kierunku wirowania punktu, którego współrzędne przyjmują wartości chwilowych amplitud sygnału dwuwymiarowego, opisującego trajektorię, nazywany jest kierunkiem wirowania punktu na trajektorii. Kierunek ten jest najczęściej identyfikowany podczas obserwacji trajektorii na monitorze z wykorzystaniem znacznika wyróżnionego położenia kątowego wału. Sposób ten został opisany w rozdz. 2.8.1 i 3.3.1.

W celu określenia kierunku wirowania przyjęto (zgodnie z [4]), że identyfikacja kierunku wirowania następuje zawsze patrząc od strony napędu (w przypadku turbozespołu patrząc od strony turbiny w kierunku generatora). Kierunek wirowania jest odnoszony do kierunku wirowania wału maszyny. Sprawdza się czy jest on współbieżny, czy przeciwbieżny.

W przypadku trajektorii przedstawionych na rys. 3.4 i 4.1 kierunek wirowania może przyjmować dwie wartości, może być zgodny (kierunek prawy) lub przeciwny (kierunek lewy) z ruchem wskazówek zegara. W przypadku trajektorii pokazanej na rys. 4.2 takie jednoznaczne, przyjmujące tylko dwie wartości, określenie kierunku wirowania nie jest możliwe.

Przyjęto, że miarą kierunku wirowania trajektorii obserwowanej na odcinku czasu T jest liczba K wyznaczana ze wzoru:

$$K = \frac{-T_L + T_P}{T},$$
 (4-39)

gdzie T_L i T_P są sumarycznymi czasami, w których wektor wodzący punktu na trajektorii obraca się w lewo oraz odpowiednio w prawo. Liczba K może przyjmować wartości z przedziału (-1, +1).

Algorytmy identyfikacji kierunku wirowania punktu trajektorii, oparte na geometrii analitycznej, przedstawiono w [38]. W pracy do wyznaczania kierunku wirowania punktu na trajektorii wykorzystano własności korelacji funkcji zespolonej. Sumaryczne odcinki czasu $T_{\rm L}$ i $T_{\rm P}$ można wyznaczyć na podstawie przebiegu wartości argumentu funkcji

$$w(t) = z(t) \cdot z^{*}(t + \tau_{1}), \qquad (4-40)$$

gdzie τ_1 jest przesunięciem czasowym, o bardzo małej wartości w porównaniu z okresem obrotu wału. Jeżeli Arg w(t) jest z przedziału (0, π), to kierunek wirowania jest prawy. Jeżeli Arg w(t) jest z przedziału (π , 2π), to kierunek wirowania jest lewy. Dla trajektorii okresowych kierunek wirowania powinien być wyznaczony na podstawie realizacji sygnału zarejestrowanej na odcinku czasu o długości będącej całkowitą wielokrotnością okresu badanej trajektorii.

Na rys. 4.21 pokazano przebieg wartości argumentu funkcji w(t) wyznaczonej dla trajektorii pokazanej na rys. 4.2. Obliczona wartość oceny kierunku wirowania trajektorii wynosi K = +0.08.



Rys. 4.21. Przebieg wartości argumentu funkcji w(.) wyznaczonej dla trajektorii pokazanej na rys. 4.2, wykres w funkcji drogi kątowej wału

Fig. 4.21. Diagram of the argument of w(.) function estimated for trajectory shown in fig. 4.2, diagram as a function of angular distance (path) of the rotor

5. PRZYKŁADY ANALIZ

5.1. Dane wejściowe

Weryfikację zaproponowanych metod analizy, opracowanych algorytmów i procedur wyznaczania cech sygnałów opisujących trajektorię ruchu środka czopa w łożysku ślizgowym, przeprowadzono na zbiorze przykładowych trajektorii zarejestrowanych dla różnych niesprawności maszyn wirnikowych. Zbiór danych testowych uzyskano na stanowisku laboratoryjnym oraz był wynikiem symulacji komputerowej drgań maszyny wirnikowej.

Dane z symulacji komputerowej

Dane z symulacji komputerowej zostały udostępnione Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej przez Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. Do ich generacji wykorzystano oprogramowanie umożliwiające zastosowanie nieliniowego modelu łożysk ślizgowych połączonego z nieliniowymi równaniami wirnika i liniowymi równaniami fundamentu [50].Symulowano drgania maszyny wirnikowej dla różnych niesprawności układu wirnik-łożyska-podpory[48, 49].

Jednymi z wielu uzyskanych wyników symulacji komputerowej są dane odpowiadające sygnałom przemieszczeń środka czopa względem panewki łożyska w kierunku poziomym i pionowym, próbkowanym ze stałym przyrostem drogi kątowej wału. Dane te, zapisane w plikach tekstowych, stanowiły wejście do opracowanych programów. W każdym wierszu zapisane były kolejno chwilowe wartości amplitud sygnałów przemieszczeń w kierunku poziomym, w kierunku pionowym i droga kątowa wału mierzona od momentu rozpoczęcia rejestracji.

Dane ze stanowiska laboratoryjnego

Wykorzystano stanowisko laboratoryjne "Rotor Kit" firmy Bently Nevada [10]. Stanowisko składało się z wirnika z dwoma tarczami, posadowionego w dwu łożyskach: jednym ślizgowym i jednym hydrodynamicznym. Położenie podpór i tarcz mogło być dowolnie zmieniane. Wirnik poprzez podatne sprzęgło napędzany był silnikiem elektrycznym o regulowanej prędkości obrotów do 11000 obr./min.

Zastosowany układ pomiarowy składał się z dwu czujników przemieszczeń względnych o osiach wzajemnie prostopadłych (o kierunku poziomym i pionowym), położonych obok panewki łożyska hydrodynamicznego. Dodatkowy czujnik przemieszczeń względnych współdziałający z karbem wykonanym na wale umożliwiał rejestrację sygnału identyfikującego wyróżnione położenie kątowe wału.

Sygnały przemieszczeń względnych w kierunku poziomym i pionowym oraz sygnał wyróżnionego położenia wału próbkowano ze stałym odstępem czasu, z wykorzystaniem Programowanego Analizatora Sygnałów PAS7, przetwornika analogowo-cyfrowego o 4096 poziomach kwantyzacji i układu nastawnych, analogowych filtrów dolnoprzepustowych. Cechy elementów układu pomiarowego opisano w [26, 27]. Sygnały dyskretne w postaci plików tekstowych stanowiły dane wejściowe dla opracowanych programów. W każdym wierszu zapisane były kolejno chwilowe wartości amplitud sygnału przemieszczeń w kierunku poziomym, w kierunku pionowym, znacznika wyróżnionego położenia wału i czas mierzony od momentu rozpoczęcia rejestracji.

Dokonano weryfikacji opracowanych algorytmów i procedur, wyznaczając cechy sygnałów zarejestrowanych dla różnym niesprawności maszyn wirnikowych. Poniżej pokazano przykłady wyników analiz trajektorii dla trzech wybranych zbiorów realizacji sygnałów. Sygnały te zarejestrowano dla układu wirnik-łożyska-podpory będącego, w rezonansie oraz dla dwóch typowych niesprawności maszyn wirnikowych: przycierania i nadmiernego przeciążenia.

5.2. Przykłady wyników analiz sygnalów zarejestrowanych w warunkach przeciążenia

W rozdziale pokazano wyniki analiz sygnałów zarejestrowanych na stanowisku laboratoryjnym dla przypadku wystąpienia przeciążenia wywołanego stałą siłą, o kierunku promieniowym, działającą na wirujący wał. Częstotliwość obrotów wirnika w momencie pobierania realizacji sygnałów była równa 49 Hz. Sposób wizualizacji wyników analiz odpowiada kierunkowi obserwacji od strony silnika w kierunku wirnika z tarczami. Kierunek obrotów wirnika jest zgodny z ruchem wskazówek zegara.

Dla celów wizualizacji przebiegów w funkcji czasu sygnały próbkowano z częstotliwością 6000 Hz. Na rys. 5.1 przedstawiono przebiegi czasowe sygnałów przemieszczeń względnych zarejestrowanych w kierunku pomiarowym poziomym i pionowym oraz odpowiadającą im trajektorię ruchu środka czopa. Na rys. 5.2 pokazano wyniki analizy korelacyjnej, z których wynika, że badana trajektoria jest okresowa o okresie w przybliżeniu równym 0.02 s.

Dla celów analizy częstotliwościowej sygnał próbkowano z częstotliwością 1000 Hz. Dokonano rejestracji ciągu 20 realizacji sygnału o długości 1024 par próbek każda. Przedstawione na rys. 5.3 estymaty gęstości widmowej mocy sygnałów wyznaczono stosując okno czasowe Hanninga oraz wygładzanie w zbiorze estymatorów. Na rys. 5.4 pokazano zastępcze dwustronne widmo amplitudowe wyznaczone na podstawie dwustronnej gęstości widmowej (dla dominujących składowych widma).

W tablicach 5.1-5.2 zestawiono wyznaczone cechy trajektorii. Część uwzględnianych w tablicach cech będzie zdefiniowana w rozdz. 6.



- Rys. 5.1. Przebiegi czasowe sygnałów przemieszczeń względnych zarejestrowanych w kierunku pomiarowym poziomym i pionowym oraz odpowiadająca im trajektoria ruchu środka czopa
- Fig. 5.1. Diagrams of relative displacements signals measured in horizontal and vertical directions and corresponding to them the trajectory of the shaft centre motion

Tablica 5.1

Lp.	Nazwa cechy	Wartość cechy
1.	Rząd trajektorii	1
2.	Stopień okresowości, maksymalna wartość części rzeczywistej znormalizowanej funkcji autokorelacji Re $r_{zz}(\tau=T_1)$	0.993
3.	Okres T ₁ (wyrażony w drodze kątowej wału) [rad]	6.28
4.	Wartość Arg $r_{zz}(\tau=T_1)$ [rad]	0.02
5.	Wartość względnego odchylenia standardowego funkcji Arg $u(t)$	0.004
6.	Całkowita moc sygnału $R_{zz}(\tau=0) \ [\mu m^2]$	661.9
7.	Zwrot kierunku wirowania punktu na trajektorii	0.376

Wyznaczone wartości cech trajektorii



- Rys. 5.2. Przebiegi wartości części rzeczywistej, argumentu i modułu znormalizowanej funkcji autokorelacji trajektorii pokazanej na rys. 5.1
- Fig. 5.2. Diagrams of real part, absolute value and argument of normalised autocorrelation function of the trajectory shown in fig. 5.1



- Rys. 5.3. Dwustronna Szz i jednostronna Gzz gęstość widmowa mocy sygnału zespolonego opisującego trajektorię pokazaną na rys. 5.1
- Fig. 5.3. 2-sided S_{zz} and 1-sided G_{zz} power spectral density of complex signal which describing the trajectory shown in fig. 5.1

Tablica 5.2

	Częstotliwość składowej widma					
allaiseannad udeidealas in Key Ministration nanaith (Noted Ki	-1f _n -49.1 [Hz]	+1 <i>f</i> n 49.1 [Hz]	-2f _n -98.3 [Hz]	+2f _n 98.3 [Hz]	-3f _n -146.4 [Hz]	+3f _n 146.4 [Hz]
Wartości składowych dwustronnej gęstości widmowej mocy sygnału [µm²/Hz]	195	19.6	16.5	28	1.36	2.3
Wartości składowych zastępczego dwustronnego widma amplitudowego [µm]	20.71	6.6	5.89	7.61	1.69	2.19
Wartości składowych jednostronnej gęstości widmowej mocy sygnału [µm ² /Hz]	e onision disp <u>i</u> rent Rey o oni	214.6	nder <u>ora</u> Nder <u>ora</u> Planavi ()	44.5	do parvi	3.66

Wyznaczone cechy sygnałów w dziedzinie częstotliwości



- Rys. 5.4. Zastępcze dwustronne widmo amplitudowe wyznaczone na podstawie dwustronnej gęstości widmowej pokazanej na rys. 5.3
- Fig. 5.4. The equivalent 2-sided amplitude spectrum estimated with 2-sided power spectral density, shown in fig. 5.3

Tablica 5.3

Wyznaczone wartości cech składowych harmonicznych trajektorii (zdefiniowanych w rozdz. 6)

Nazwa cechy	Częstotliwość składowej $1f_n = 49.1$ [Hz]	Częstotliwość składowej 2f _n = 98.3 [Hz]	Częstotliwość składowej 3f _n = 146.4 [Hz]
Wielkość składowej harmonicznej trajektorii [µm]	27.36	- 13.5	3.88
Zwrot kierunku wirowania składowej harmonicznej (w stosunku do kierunku obrotów wału maszyny)	współbieżny	przeciwbicżny	przeciwbieżny
Ocena kształtu składowej harmonicznej trajektorii	0.516	0.127	0.128

5.3. Przykłady wyników analiz sygnałów zarejestrowanych w warunkach przycierania

W rozdziale pokazano wyniki analiz sygnałów zarejestrowanych na stanowisku laboratoryjnym dla przypadku wystąpienia przycierania wirującego wału o nieruchomy element przymocowany do obudowy stanowiska. Częstotliwość obrotów wirnika w momencie pobierania realizacji sygnałów była równa 149 Hz. Sposób wizualizacji wyników odpowiada kierunkowi obserwacji od strony silnika w kierunku wirnika z tarczami. Kierunek obrotów wirnika jest zgodny z ruchem wskazówek zegara.

Dla celów wizualizacji przebiegów w funkcji czasu sygnały próbkowano z częstotliwością 7009 Hz. Na rys. 5.5 przedstawiono przebiegi czasowe sygnałów przemieszczeń względnych zarejestrowanych w kierunku pomiarowym poziomym i pionowym oraz odpowiadającą im trajektorię ruchu środka czopa. Na rys. 5.6 pokazano wyniki analizy korelacyjnej.

Dla celów analizy częstotliwościowej sygnał próbkowano z częstotliwością 1000 Hz. Dokonano rejestracji ciągu 20 realizacji sygnału długości 1024 par próbek każda.



Rys. 5.5. Przebiegi czasowe sygnałów przemieszczeń względnych zarejestrowanych w kierunku pomiarowym poziomym i pionowym oraz odpowiadająca im trajektoria ruchu środka czopa

Fig. 5.5. Diagrams of relative displacements signals measured in horizontal and vertical directions and corresponding to them the trajectory of the shaft centre motion



- Rys. 5.6. Przebiegi wartości części rzeczywistej, modułu i argumentu znormalizowanej funkcji autokorelacji trajektorii pokazanej na rys. 5.5
- Fig. 5.6. Diagrams of real part, absolute value and argument of normalised autocorrelation function of the trajectory shown in fig. 5.5

Przedstawione na rys. 5.7 i rys. 5.8 estymaty gęstości widmowej mocy sygnałów wyznaczono stosując okno czasowe Hanninga oraz wygładzanie w zbiorze estymatorów. Na rys. 5.9 pokazano zastępcze dwustronne widmo amplitudowe wyznaczone na podstawie dwustronnej gęstości widmowej (dla dominujących składowych widma).

W tablicach 5.4-5.6 zestawiono wyznaczone cechy trajektorii. Część uwzględnianych w tablicach cech będzie zdefiniowana w rozdz. 6.

Tablica 5.4

Lp.	Nazwa cechy	Wartość cechy
1.	Rząd trajektorii	1
2.	Stopień okresowości, maksymalna wartość części rzeczywistej znormalizowanej funkcji autokorelacji Re $r_{zz}(\tau=T_1)$	0,991
3.	Okres T ₁ (wyrażony w drodze kątowej wału) [rad]	12.57
4.	Wartość Arg $r_{zz}(\tau=T_1)$ [rad]	0.04
5.	Wartość względnego odchylenia standardowego funkcji Arg $u(t)$	0.002
6.	Całkowita moc sygnału $R_{zz}(\tau=0) \ [\mu m^2]$	1758.4
7.	Zwrot kierunku wirowania punktu na trajektorii	0.431

Wyznaczone wartości cech trajektorii





Fig. 5.7. 2-sided S_{zz} and 1-sided G_{zz} power spectral density of complex signal which describing the trajectory shown in fig. 5.5



- Rys. 5.8. Dwustronna S_{xx} i jednostronna G_{xx} gęstość widmowa mocy sygnału rzeczywistego zarejestrowanego w kierunku poziomym pokazanego na rys.5.5
- Fig. 5.8. 2-sided S_{xx} and 1-sided G_{xx} power spectral density of real signal measured in horizontal direction, shown in fig. 5.5



- Rys. 5.9. Zastępcze dwustronne widmo amplitudowe wyznaczone na podstawie dwustronnej gęstości widmowej pokazanej na rys. 5.7
- Fig. 5.9. The equivalent 2-sided amplitude spectrum estimated with 2-sided power spectral density, shown in fig. 5.7

Tablica 5.5

4/5 II. Przebieci wartości mochiki, czas	Częstotliwość składowej widma			
Regen - genta plan destruterios in alta an Individud in general destruterios atematic	-0.5fn -74.7[Hz]	+0.5f _n 74.7[Hz]	-fn -149.5[Hz]	+f _n 149.5 [Hz]
Wartości składowych dwustronnej gęstości widmowej mocy sygnału [µm ² /Hz]	119	149	252	1.3
Wartości składowych zastępczego dwustronnego widma amplitudowego [µm]	15.52	17.37	22.89	1.58
Wartości składowych dwustronnej gęstości widmowej mocy sygnału [µm²/Hz]	-	269	-	253

Wyznaczone cechy sygnałów w dziedzinie częstotliwości

Tablica 5.6

Wyznaczone wartości cech składowych harmonicznych trajektorii (zdefiniowanych w rozdz. 6)

Nazwa cechy	Częstotliwość składowej	Częstotliwość składowej
a dencement overheart & doothe has	$0.5f_{\rm n} = 74.7[{\rm Hz}]$	$f_{\rm n} = 149.5 [{\rm Hz}]$
Wielkość składowej harmonicznej trajektorii[µm]	32.89	24.47
Zwrot kierunku wirowania składowej harmonicznej (w stosunku do kierunku obrotów wału maszyny)	przeciwbieżny	współbieżny
Ocena kształtu składowej harmonicznej trajektorii	0.056	0.870

- 95 -

5.4. Przykłady wyników analiz sygnalów zarejestrowanych w warunkach rezonansu

Pokazano wyniki analiz umożliwiających porównanie dwu trajektorii. Dane wejściowe uzyskano z symulacji komputerowej. Symulowane były drgania układu złożonego z wirnika łożyskowanego na końcach w dwu łożyskach hydrodynamicznych z luzem kołowocylindrycznym. Sygnały dwuwymiarowe opisujące drgania czopa zarejestrowano dla dwu częstotliwości obrotów wału: sygnał "m" dla częstotliwości 33.33 [Hz] i sygnał "z" dla częstotliwości 35 [Hz].

Zidentyfikowana częstotliwość rezonansowa układu wirnik-lożyska-podpory wynosiła 36 [Hz]. Spowodowało to, że dwie trajektorie otrzymane dla mało różniących się częstotliwości obrotów wału maszyny różnią się wielkością, są względem siebie obrócone o niewielki kąt oraz zmieniło się położenie znacznika wyróżnionego położenia kątowego wału na trajektoriach.

Sposób wizualizacji wyników analiz odpowiada kierunkowi obserwacji od strony napędu w kierunku wirnika z tarczą. Kierunek obrotów wirnika jest przeciwny do ruchu wskazówek zegara. Porównywane trajektorie mają identyczne okresy wyrażone w drodze kątowej wału, równe 2π -rad.

Na rys. 5.10 przedstawiono porównywane trajektorie ruchu środka czopa względem panewki łożyska. Na rys. 5.11 pokazano wyniki analizy korelacyjnej. W tablicy 5.7 zestawiono wyznaczone cechy wzajemne trajektorii.



Rys. 5.10. Dwie porównywane trajektorie Fig. 5.10. Two compared trajectories



- Rys. 5.11. Przebiegi wartości modułu, części rzeczywistej i argumentu znormalizowanej funkcji korelacji wzajemnej trajektorii pokazanych na rys. 5.10
- Fig. 5.11. Diagrams of real part, absolute value and argument of normalised cross correlation function of trajectories shown in fig. 5.10

Tablica 5.7

Lp.	Nazwa cechy	Wartość	
_	And the second state of the second states of the second states and the	сеспу	
1.	Ocena podobieństwa trajektorii "z" z trajektorią "m", wartość maksymalna modułu znormalizowanej funkcji korelacji wzajemnej $r_{mz}(\upsilon)$	0.993	
2.	Kąt względnego położenia trajektorii, $\alpha = 2\pi$ -Arg r_{mz} (υ_1), gdzie υ_1 opóźnienie, dla którego funkcja r_{mz} osiąga maksimum, [rad]	6.196	
3.	Względne odchylenie standardowe Arg $u(\phi)$	0.006	
4.	Wartość opóźnienia czasowego, dla którego funkcja r_{mz} osiąga maksimum, wyrażana w drodze kątowej wału, [rad]	6.062	

Cechy wzajemne trajektorii pokazanych na rys. 5.10

6. ZASTOSOWANIE WYZNACZANYCH CECH TRAJEKTORII

6.1. Zastosowanie wyników analiz korelacyjnych

6.1.1. Ocena okresowości trajektorii

Ze względu na potrzebę automatyzacji procesu wnioskowania o stanie technicznym maszyny na podstawie cech trajektorii istnieje konieczność wprowadzenia oceny okresowości trajektorii.

Zgodnie z rozdz. 4.3.2 analiza zmiany części rzeczywistej i urojonej funkcji autokorelacji w funkcji czasu opóźnienia umożliwia wyznaczenie wartości okresu. Podczas analizy trajektorii okresowej, dla przesunięcia czasowego równego okresowi T_1 , wartość części rzeczywistej funkcji autokorelacji osiąga lokalne maksimum wartości.

Wartość części rzeczywistej znormalizowanej funkcji autokorelacji dla przesunięcia czasowego równego okresowi $\tau=T_1$ stanowi ocenę okresowości sygnału, która będzie nazywana stopniem okresowości trajektorii.

Podczas analizy trajektorii "idealnie" okresowej dla $\tau=T_1$ część rzeczywista (i zarazem moduł) znormalizowanej funkcji autokorelacji przyjmuje wartość 1, ponieważ Re $(R_{zz}) = |R_{zz}| = R_{zz}(\theta)$. Wówczas część urojona funkcji r_{zz} ($\tau = T_1$) osiąga wartość zero. Z kolei w przypadku analizy trajektorii losowej (będącej odpowiednikiem białego szumu) część rzeczywista znormalizowanej funkcji autokorelacji, dla każdego τ większego od 0, przyjmuje wartość 0. Oznacza to, że stopień okresowości trajektorii może przyjmować wartości z przedziału (0, 1).

Zdaniem autora, obserwacja zmian wartości argumentu funkcji u(t) zdefiniowanej jako:

$$u(t) = z(t) \cdot z^*(t - T_1), \tag{6-1}$$

będącej funkcją zespoloną, uzupełnia ocenę okresowości trajektorii. W przypadku analizy trajektorii "idealnie" okresowej wartość funkcji Arg u(t) powinna być stale równa zero. Natomiast podczas analizy dowolnej trajektorii wielkość zmian wartości funkcji Arg u(t)stanowi dodatkową ocenę okresowości trajektorii. Oceną zmian wartości argumentu może być jego odchylenie standardowe. Wartość odchylenia standardowego w przypadku trajektorii okresowej powinna być jak najmniejsza.

Osobnego omówienia wymagają trajektorie prawie okresowe. Przykład trajektorii prawie okresowej pokazano na rys. 6.1. Dla trajektorii można wyróżnić powtarzające się fragmenty, lecz nie pokrywające się i obrócone względem siebie o pewien kąt. Najczęściej dla takiej krzywej można wyznaczyć kąt obrotu β, o który obracając powtarzający się fragment

trajektorii spowoduje się pokrycie przez niego następnego fragmentu. Środkiem obrotu jest środek trajektorii wyznaczony dla krzywej zarejestrowanej na odpowiednio długim odcinku czasu. Trajektorie te z formalnego punktu widzenia można uznać za nieokresowe.

Ocenę tak zdefiniowanej cechy okresowości trajektorii umożliwiają wyniki analizy korelacyjnej. W przypadku trajektorii prawie okresowej maksymalne wartości modułu znormalizowanej funkcji autokorelacji są wyraźnie większe od maksymalnych wartości części rzeczywistej tej funkcji (rys. 6.1). Wartość funkcji Arg $r_{zz}(\tau=T_1)$, gdzie T_1 jest przesunięciem czasowym, dla którego moduł funkcji autokorelacji osiąga maksimum, pozwala określić kąt β . Kąt ten można określić jako $\beta = \operatorname{Arg} r_{zz}(\tau=T_1) - 2\pi$.

Aby rozstrzygnąć czy badana trajektoria jest prawie okresowa, należy sprawdzić przebieg wartości argumentu funkcji u(t) zdefiniowanej wzorem (6-1). Dla trajektorii prawie okresowej wartość funkcji Arg u(t) powinna być stała, a dokładniej - oscylować wokół jednej wartości. W przypadku analizy trajektorii pokazanej na rys. 6.1 pokazany na rys. 6.2 przebieg wartości funkcji Arg u(t) oscyluje wokół wartości kąta β +2 π .



 Rys. 6.1. Trajektoria prawie okresowa oraz przebiegi modułu, części rzeczywistej i argumentu znormalizowanej funkcji autokorelacji trajektorii jako funkcje drogi kątowej wału
 Fig. 6.1. The almost periodic trajectory and diagrams of absolute value, real part and argument

of normalised autocorrelation function of the trajectory shown as a function of angular distance of the rotor Podczas analizy dowolnej trajektorii wielkość wartości średniej Arg u(t) stanowi dodatkową ocenę okresowości trajektorii. Ocenę tę należy zawsze rozpatrywać wspólnie z wartością odchylenia standardowego Arg u(t). W przypadku gdy wartość średnia argumentu jest porównywalna z odchyleniem standardowym lub jest większa, można przypuszczać, że analizowana trajektoria jest prawie okresowa. Wówczas wartość średnia funkcji Arg u(t) stanowi dodatkową ocenę okresowości trajektorii.

W przypadku gdy wartość średnia Arg u(t) jest zdecydowanie mniejsza od odchylenia standardowego, wielkość wartości średniej argumentu, nawet wtedy, gdy osiągnie dużą wartość, nie świadczy, że analizowana trajektoria jest trajektorią prawie okresową.



Rys. 6.2. Przebieg wartości Arg u(.) w funkcji drogi kątowej wału dla opóźnienia czasowego $T_1=1.91\cdot 2\pi$ [rad], wyznaczonego na podstawie rys. 6.1

Fig. 6.2. A Diagram of value of Arg u(.) shown as a function of angular distance of the rotor, for time displacement $T_1=1.91\cdot 2\pi$ [rad], estimated from fig 6.1

6.1.2. Zastosowanie ocen podobieństwa dwu trajektorii

W rozdz. 4.4.4 opisano metodę umożliwiającą porównywanie kształtu dwu trajektorii centralnych. Do wyznaczania ilościowego podobieństwa kształtu trajektorii wykorzystano funkcję korelacji wzajemnej sygnałów zespolonych opisujących porównywane trajektorie.

Opracowana metoda porównywania trajektorii ma następujące zalety:

- uwzględnia fakt, że porównywane trajektorie są sygnałami będącymi funkcjami czasu;
- zapis trajektorii jako funkcji drogi kątowej wału umożliwia porównywanie trajektorii zarejestrowanych przy różnych prędkościach wału maszyny;
- na otrzymywane wyniki nie ma wpływu wielkość porównywanych trajektorii;
- umożliwia porównywanie trajektorii obróconych względem siebie o dowolny kąt.

Wynikiem analizy są liczby określające ilościowe podobieństwo trajektorii. Zgodnie z rozdz. 4.4.5 wynikiem porównania trajektorii są:

- maksymalna wartość modułu znormalizowanej funkcji korelacji wzajemnej i odchylenie standardowe argumentu funkcji $u(\varphi)$ (zdefiniowanej w rozdz. 4.4.4), będące ocenami podobieństwa kształtu trajektorii;
- argument funkcji korelacji dla opóźnienia odpowiadającego maksymalnej wartości jej modułu, będący wartością kąta obrotu między porównywanymi trajektoriami (argument

może stanowić ocenę tylko wtedy, jeżeli oceny podobieństwa kształtu trajektorii są odpowiednio duże).

Ponieważ na wyniki prowadzonych analiz nie ma wpływu wielkość porównywanych trajektorii, uzupełnieniem uzyskanych wyników powinny być wartości cech opisujących wielkość trajektorii (rozdz. 3.3.2). Oceną wielkości trajektorii jest moc sygnału zespolonego opisującego trajektorię, którą można wyznaczyć na podstawie funkcji autokorelacji jako wartość modułu $R_{zz}(\tau=0)$.

Uzyskane oceny podobieństwa trajektorii mogą być wykorzystane 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 "makro" eksploatacji maszyny.
- Porównywania trajektorii zarejestrowanych jednocześnie w dwu łożyskach maszyny wirnikowej.

6.2. Zastosowanie wyników analizy częstotliwościowej

6.2.1. Skladowe harmoniczne trajektorii

Zgodnie z rozdz. 4.5.6 analiza częstotliwościowa większości trajektorii umożliwia ich opis za pomocą składowych harmonicznych trajektorii. Wynikiem obserwacji składowej harmonicznej w funkcji czasu na płaszczyźnie prostokątnego układu współrzędnych jest elipsa. Obecnie do ich obserwacji stosowane są najczęściej układy analogowe opisane w rozdz. 3.3.3.

Składową harmoniczną trajektorii można opisać przez podanie jej częstotliwości, wielkości, kierunku wirowania itp. Z punktu widzenia diagnostyki, są to ważne cechy sygnału, wykorzystywane w relacjach diagnostycznych, opisujące badane zjawiska drgań wału w płaszczyźnie promieniowej.

Częstotliwość składowej harmonicznej trajektorii

W maszynach wirnikowych większość opisywanych niesprawności jest przyczyną powstawania drgań promieniowych wirnika, których częstotliwości, odniesione do częstotliwości obrotów wirnika, przyjmują znane, charakterystyczne wartości. Podczas analizy sygnałów przemieszczeń względnych uwzględniane są najczęściej składowe o częstotliwości z przedziału nie przekraczającego kilkakrotnie częstotliwości obrotów wirnika. Opis relacii diagnostycznych uwzględniających wartość częstotliwości dominujących składowych widma trajektorii można znaleźć między innymi w [55, 60].

Wielkość składowej harmonicznej trajektorii

Najbardziej reprezentatywną cechą opisującą wielkość składowej harmonicznej o zadanej częstotliwości f_k jest długość dużej półosi elipsy $r_{max}[f_k]$, będącej wykresem przebiegu czasowego składowej harmonicznej (rys 6.3). Wielkość ta jest analogiczna do zdefiniowanej w normie VDI 2059 [86] wielkości s_{max} (w normie VDI, s_{max} opisuje wielkość trajektorii traktowanej jako sygnał szerokopasmowy).

Wartości amplitud $X[f_k]$, $Y[f_k]$ odpowiednich składowych widm amplitudowych sygnałów jednowymiarowych zarejestrowanych w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach pomiarowych są mniej reprezentatywne. Odpowiadają bowiem jedynie dwóm (przypadkowym) kierunkom pomiarowym. Wypadkowa tych dwu wielkości (będąca sumą wektorową) nie odpowiada długości dużej osi elipsy (rys 6.3). Dodatkowo do jej wyznaczenia konieczna jest znajomość widma amplitudowo-fazowego, co wymaga założenia, że analizowany sygnał jest okresowy.

Zwrot kierunku wirowania składowej harmonicznej trajektorii

Zwrot kierunku wirowania składowej harmonicznej należy odnosić do kierunku obrotu wirnika. Opisywanym w literaturze niesprawnościom przyporządkowane są odpowiadające im kierunki wirowania składowych częstotliwościowych, wywołujące precesję współbieżną lub przeciwbieżną wału.

Zwrot kierunku wirowania składowej harmonicznej może być zgodny lub przeciwny z kierunkiem obrotów wirnika. W przypadku gdy składowa przybiera kształt odcinka, kierunek wirowania jest nieokreślony.



Rys. 6.3. Cechy składowej harmonicznej trajektorii Fig. 6.3. Characteristics of the trajectory harmonics components

Ocena kształtu składowej harmonicznej trajektorii

Kształt elipsy, będącej wykresem przebiegu czasowego składowej harmonicznej trajektorii, w pełni opisują długości małej półosi r_{min} i dużej półosi r_{max} elipsy. Cecha opisująca kształt składowej harmonicznej trajektorii może być zdefiniowana jako stosunek długości małej do dużej półosi elipsy (rys 6.3). Tak zdefiniowana cecha może przyjmować wartości z przedziału (0,1). Szczególnymi przypadkami są składowe o kształcie odcinka i okręgu.

Obecnie kształt składowej harmonicznej (jej płaskość) jest wykorzystywany, między innymi, do określania anizotropii sztywności układu łożysko-podpora w płaszczyźnie promieniowej [64].

Położenie katowe składowej harmonicznej trajektorij

Kąt skierowany, zawarty między osią poziomą układu współrzędnych a dużą osią elipsy będącej wykresem składowej harmonicznej (rys. 6.3), nazwano położeniem kątowym składowej harmonicznej.

Położenie kątowe składowej harmonicznej w połączeniu z informacją o jej kształcie umożliwia, między innymi, rozpoznanie kierunku wymuszeń lub najmniejszej sztywności układu [15]. W przypadku drgań układu z częstotliwością rezonansową cecha ta umożliwia określenie kierunku drgań rezonansowych.

6.2.2. Określanie cech składowych harmonicznych trajektorii na podstawie widm trajektorii

Zespolone widmo sygnału zespolonego opisującego trajektorię poliharmoniczną stanowi pełny jej opis w dziedzinie częstotliwości. Poniżej przedstawiono sposób określania składowych trajektorii harmonicznych na podstawie składowych częstotliwościowych widma trajektorii.

W rozdz. 4.5.3 pokazano interpretację geometryczną widma zespolonego, będącego wynikiem analizy trajektorii zapisanej w postaci zespolonej. Zgodnie z tą interpretacją k-tej składowej widma zespolonego o częstotliwości f_k

$$Z[f_k] \cdot \exp(j2\pi f_k t) \tag{6.2}$$

na płaszczyźnie zespolonej odpowiada wektor o długości równej $|Z[f_k]|$, zaczepiony w początku układu współrzędnych i wirujący ze stałą prędkością kątowa

$$\omega_k = 2\pi f_k \,. \tag{6-3}$$

W przypadku gdy częstotliwość składowej f_k jest dodatnia, prędkość kątowa ma również wartość dodatnią, co odpowiada kierunkowi obrotu w lewo (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 zaczepionych w początku układu współrzędnych i wirujących wokół niego z jednakowymi co do wartości bezwzględnej prędkościami kątowymi, ale o przeciwnych kierunkach obrotu. Suma tych dwu wektorów wyznaczona dla dowolnej chwili czasu tworzy

wektor oznaczony na rys. 6.4 $r[f_k]$. Można wykazać, że koniec wektora $r[f_k]$ wyznaczony dla kolejnych chwil czasu kreśli na płaszczyźnie zespolonej elipsę (w szczególnych przypadkach okrąg lub odcinek).

Podsumowując stwierdza się, że składowa harmoniczna trajektorii opisana jest przez dwie składowe częstotliwościowe widma zespolonego trajektorii. Umożliwia to wyznaczanie wartości cech składowych trajektorii na podstawie widma zespolonego.

Przyjmując założenie, że analizowane trajektorie ruchu środka wału są trajektoriami słabo okresowymi, wartości cech składowych harmonicznych trajektorii zdefiniowane w rozdz.6.2.1 można wyznaczać na podstawie dwustronnej gęstości widmowej mocy sygnału zespolonego, opisującego trajektorię lub wyznaczonego na jego podstawie zastępczego widma amplitudowego.

Wielkość składowej harmonicznej trajektorii

Wielkość składowej harmonicznej trajektorii zdefiniowano jako długość dużej półosi elipsy będącej wykresem przebiegu czasowego składowej. Wielkość wybranej składowej trajektorii harmonicznej o częstotliwości f_k jest algebraiczną sumą składowych dwustronnego zastępczego widma amplitudowego trajektorii $A_{zz}[f_k]$ i $A_{zz}[-f_k]$.



Rys. 6.4. Składowa harmoniczna trajektorii jako sumy składowych widma sygnału zespolonego opisującego trajektorię

Fig. 6.4. The trajectory harmonic component as a sum of two components of the spectrum of complex signal describing the trajectory

Zwrot kierunku wirowania składowej trajektorii harmonicznej

Zwrot kierunku wirowania składowej harmonicznej trajektorii jest zawsze zgodny z kierunkiem wirowania składowej zastępczego dwustronnego widma amplitudowego o większej wartości. Jeżeli :

- $A_{72}[f_k] \langle A_{72}[-f_k] zwrot kierunku wirowania jest zgodny z ruchem wskazówek zegara;$
- $A_{zz}[f_k] > A_{zz}[-f_k]$ zwrot kierunku wirowania jest przeciwny z ruchem wskazówek zegara;
- Azz[fk] = Azz[-fk] zwrot kierunku wirowania jest nieokreślony (przypadek gdy wykresem składowej jest odcinek).

W analogiczny sposób zwrot kierunku wirowania można określić na podstawie składowych dwustronnej gęstości widmowej mocy.

Ocena kształtu składowej harmonicznej trajektorii

Cechę, opisującą kształt składowej harmonicznej trajektorii, zdefiniowano jako stosunek długości małej i dużej półosi elipsy, będącej wykresem składowej. Dla wybranej składowej harmonicznej trajektorii o częstotliwości f_k wielkość tę można wyznaczyć na podstawie składowych $A_{zz}[f_k]$ i $A_{zz}[-f_k]$ zastępczego dwustronnego widma amplitudowego trajektorii jako

$$\frac{r_{\min}}{r_{\max}} = \frac{|A_{zz}[f_k] - A_{zz}[-f_k]|}{A_{zz}[f_k] + A_{zz}[-f_k]}.$$
(6-4)

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.

Bezpośrednia obserwacja zastępczego dwustronnego widma amplitudowego trajektorii (lub dwustronnej gęstości widmowej) umożliwia ocenę wyznaczanych cech jej składowych harmonicznych.

6.2.3. Zastosowanie widm trajektorii do zapisu relacji diagnostycznych

Promieniowe przemieszczenia względne wałów są jednym z głównych źródeł danych o stanie technicznym i warunkach działania maszyny wirnikowej (rozdz. 1.3). Znane są [14, 15, 60] relacje diagnostyczne między stanem technicznym maszyn wirnikowych a symptomami tego stanu, będącymi cechami sygnałów przemieszczeń względnych w dziedzinie częstotliwości, umożliwiające rozpoznawanie większości typowych niesprawności maszyn wirnikowych.

Cechy sygnałów przemieszczeń względnych w dziedzinie częstotliwości, wykorzystywane w relacjach diagnostycznych, są głównie wyznaczane na podstawie widm gęstości mocy sygnałów składowych trajektorii. Analizowane są częstotliwości i wartości dominujących składowych widm. Znane są zależności pomiędzy niesprawnościami układu wirnik- łożyska-

podpory a obecnością w widmie składowych o charakterystycznych częstotliwościach, będących najczęściej subharmonicznymi i superharmonicznymi częstotliwości obrotów wirnika [55].

Przy stosowaniu specjalnego układu aparatury obserwowane są wybrane składowe częstotliwościowe trajektorii (najczęściej tylko niewielka liczba z góry określonych składowych). Najważniejsze cechy składowych, na które zwracana jest uwaga, to opisane w rozdz. 6.2.1: wielkość, kształt i kierunek wirowania. Cech tych nie można określić na podstawie widmowych gęstości mocy sygnałów składowych trajektorii.

W przypadku braku możliwości obserwacji składowych częstotliwościowych trajektorii uzupełnieniem informacji uzyskanych na podstawie widmowych gęstości mocy sygnałów składowych jest obserwacja trajektorii. Szczególnie kształt trajektorii i kierunek wirowania punktu na trajektorii stanowią uzupełnienie wyników analizy częstotliwościowej. Cechy te, dla prostych przypadków niesprawności (gdy w widmie dominuje niewielka ilość składowych), pozwalają określić cechy składowych trajektorii harmonicznych (szczególnie kierunek wirowania), których częstotliwości określono na podstawie widm.

Obecnie automatyczna identyfikacja cech trajektorii w dziedzinie częstotliwości (realizowana przez układy nadzoru) ogranicza się do obserwacji wartości wybranych składowych gęstości widmowych mocy sygnałów jednowymiarowych. Określanie większości uwzględnianych w relacjach cech trajektorii dokonywane jest subiektywnie przez osobę prowadzącą analizę w wyniku obserwacji trajektorii na ekranie.

Wynik opracowanej metody analizy częstotliwościowej trajektorii w postaci dwustronnego widma gęstości mocy lub zastępczego widma amplitudowego umożliwia uzyskanie większości opisywanych powyżej informacji, wykorzystywanych w relacjach diagnostycznych. Sposób ich identyfikacji opisano w rozdz. 6.2.2. Dodatkowymi zaletami opracowanej metody są :

- zmniejszenie liczby wykonywanych analiz oraz brak konieczności stosowania specjalnych zestawów aparatury;
- możliwość wprowadzenia ściśle zdefiniowanych cech i wyznaczania ich automatycznie.

Przykład

Poniżej pokazano sposób identyfikacji nadmiernego przeciążenia, wykorzystujący cechy sygnałów przemieszczeń względnych w dziedzinie częstotliwości. Przeciążenie jest jednym z najczęściej występujących problemów eksploatacyjnych dużych maszyn wirnikowych [64]. Ponieważ w przypadku maszyn wirnikowych szczątkowe niewyrównoważenie jest praktycznie zawsze obecne [54, 72], dodatkowo uwzględniono wymuszenie drgań wywołane niewyrównoważeniem wirnika.

Nadmierne przeciążenie powstaje w wyniku oddziaływania na obracający się wirnik składowych obciążenia o promieniowym kierunku działania [55]. Powoduje ono nadmierne

ugięcie wału, co w połączeniu z momentem obrotowym przenoszonym przez wał wywołuje drgania nazywane drganiami krytycznymi drugiego rzędu.

Opis drgań giętnych wirników umożliwiają opisywane w literaturze [54, 72] proste liniowe modele maszyny wirnikowej. Zgodnie z nimi w przypadku przeciążenia ruch osi wirnika w płaszczyźnie prostopadłej do osi jest ruchem wypadkowym dwóch ruchów: o częstotliwości obrotów wirnika (składowa lf_n) i o częstotliwości drugiej harmonicznej tych obrotów (składowa $2f_n$).

Ruch o częstotliwości obrotów wirnika jest głównie wynikiem szczątkowego niewyrównoważenia wirnika. Wywołuje ono precesję współbieżną, czyli współbieżny ruch linii ugięcia wału wókół osi łożysk (kinetostatycznej linii ugięcia) zgodny z kierunkiem obrotu wirnika. Ruch osi wału, odpowiadający składowej sygnału o częstotliwości obrotów wirnika, obserwowany w płaszczyźnie prostopadłej do osi wału, odbywa się w kierunku zgodnym z kierunkiem wirowania wału.

Przeciążenie wywołuje ruch osi wału o częstotliwości drugiej harmonicznej obrotów wału (składowa $2f_n$). Ruch środka wału odbywa się w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów wału, przy czym na jeden obrót wału środek wału dwukrotnie zatacza elipsę wokół kinematycznej linii ugięcia wału. Złożenie dwu wymuszeń (od niewyrównoważenia i przeciążenia) powoduje, że środek wału porusza się po trajektorii o kształcie zbliżonym do banana lub ósemki (rys. 5.1).

Zgodnie z powyższym typowymi symptomami przeciążenia (będącymi cechami sygnałów przemieszczeń względnych w dziedzinie częstotliwości) jest wzrost wartości amplitudy składowej widma o częstotliwości $2f_n$ dla obydwu kierunków pomiarowych. Drugą dominującą składową w widmie jest składowa lf_n pochodząca od niewyrównoważenia wirnika.

Jednoznaczna identyfikacja nadmiernego przeciążenia jedynie na podstawie widmowych gęstości mocy sygnałów składowych trajektorii nie jest możliwa. Obecność w widmie składowej o częstotliwości $2f_n$ może być wywołana innymi niesprawnościami maszyny wirnikowej, np. pęknięciem wału lub asymetrią jego sztywności [91]. Dlatego uwzględniane są dodatkowe informacje, najczęściej kształt trajektorii. Sprawdza się, czy trajektoria przyjmuje kształt podobny do banana lub ósemki.

Na rys. 5.4 pokazano zastępcze dwustronne widmo amplitudowe sygnału zespolonego, opisującego trajektorię zarejestrowaną przy nadmiernym przeciążeniu. Stanowi ono wygodny do interpretacji sposób opisu trajektorii w dziedzinie częstotliwości. W przypadku przeciążenia, podobnie jak dla widm sygnałów składowych trajektorii, składowe o częstotliwości lf_n i $2f_n$ są dominujące. Na podstawie widma (rys. 5.4.) łatwo można określić kierunek obrotu poszczególnych składowych harmonicznych trajektorii (kierunek wirowania wału maszyny jest zgodny z ruchem wskazówek zegara (rys. 5.1.)):

- składowa 1fn po stronie częstotliwości ujemnych jest większa od odpowiadającej jej składowej po stronie dodatniej, czyli kierunek obrotu składowej jest zgodny z ruchem wskazówek zegara i zarazem zgodny z kierunkiem wirowania wału;
- składowa 2f_n po stronie częstotliwości dodatnich jest większa od odpowiadającej jej składowej po stronie ujemnej, czyli kierunek obrotu składowej jest przeciwny do kierunku wirowania wału;

Pokazany sposób identyfikacji nadmiernego przeciążenia jest przykładem tworzenia relacji diagnostycznych na podstawie wyników analizy częstotliwościowej sygnału zespolonego, opisującego trajektorię ruchu środka czopa w łożysku ślizgowym [91].
7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

7.1. Uzyskane wyniki

Od wielu lat w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej [74, 68] prowadzone są badania nad wykorzystaniem technik sztucznej inteligencji do wspomagania procesu diagnozowania stanu technicznego maszyn wirnikowych. W trakcie prowadzenia tych prac wyłoniła się potrzeba automatycznego wyznaczania cech trajektorii ruchu środka czopa w łożysku hydrodynamicznym.

Po dokonaniu przeglądu dostępnych opisów wyników prac stwierdzono, że brakuje ogólnie uznanych metod wyznaczania cech trajektorii środka czopa. Przeprowadzono badania literaturowe obejmujące:

- rozpoznanie stosowanych technik pomiaru przemieszczeń względnych;
- zestawienie cech trajektorii wykorzystywanych w znanych relacjach diagnostycznych;
- przegląd podstawowych norm i zaleceń dotyczących ilościowych ocen przemieszczeń względnych czopa.

Ponadto:

- dokonano formalnego opisu identyfikowanych cech trajektorii;
- opracowano metody identyfikacji wprowadzonych cech trajektorii zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości, z wykorzystaniem technik cyfrowych;
- opracowano algorytmy pozwalające na wyznaczanie tych cech;
- opracowano oprogramowanie umożliwiające wyznaczanie wartości cech trajektorii (współdziałające z opracowanym w KPKM pakietem programów MAS, pozwalającym budować systemy doradcze [86, 74]);
- przeprowadzono badania weryfikacyjne obejmujące rejestrację i analizę sygnałów;
- weryfikowano przydatność opracowanych metod analizując sygnały zarejestrowane dla typowych niesprawności maszyn wirnikowych;
- sprawdzono możliwość identyfikacji relacji diagnostycznych, umożliwiających rozpoznawanie wybranych niesprawności maszyn wirnikowych, wykorzystujących wprowadzone cechy trajektorii.

Weryfikacja opracowanych metod wyznaczania cech trajektorii na zbiorze sygnałów towarzyszących typowym niesprawnościom układu wirnik-łożyska-podpory wykazała przydatność opracowanych metod.

Opracowane metody wyznaczania cech trajektorii (ocenianych dotychczas subiektywnie na podstawie obserwacji trajektorii) umożliwiły jej opis zbiorem automatycznie wyznaczanych liczb (parametrów). Pozwoliło to uwzględnić zarówno cechy ilościowe, jak i jakościowe trajektorii w bazie danych systemu doradczego, wspomagającego diagnozowanie maszyn wirnikowych.

W tablicach 7.1-7.3 zestawiono oceny sygnału zespolonego, które proponowane są jako cechy opisujące trajektorię. Zdaniem autora jest to wystarczający zbiór cech opisujących trajektorię dla potrzeb porównywania różnych trajektorii w procesie wnioskowania diagnostycznego. Przewiduje się zapisywanie proponowanych cech trajektorii w polach rekordów bazy danych systemu doradczego, wspomagającego diagnozowanie maszyn wirnikowych.

7.2. Wnioski

- Analiza ruchu środka czopa w łożysku ślizgowym w płaszczyźnie promieniowej, rejestrowanego w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach pomiarowych, jako składowe sygnału zespolonego, pozwala na wyznaczanie symptomów diagnostycznych, które trudno otrzymać na podstawie niezależnej analizy sygnałów składowych.
- Przyjęty zapis sygnałów składowych opisujących trajektorię w postaci funkcji zespolonej umożliwił formalny zapis jej właściwości, ułatwił opis wykonywanych przekształceń i skrócił czas niezbędnych obliczeń (zastosowanie FFT).
- Badania wykazały, że możliwa jest automatyczna identyfikacja cech trajektorii środka czopa w łożysku hydrodynamicznym, istotnych z punktu widzenia diagnostyki technicznej, ocenianych dotychczas subiektywnie przez prowadzących badania.
- 4. Potwierdzone zostało przypuszczenie, że istnieje możliwość zdefiniowania nowych cech trajektorii, istotnych z punktu widzenia diagnostyki technicznej maszyn wirnikowych, które umożliwią identyfikację relacji diagnostycznych między wybranymi niesprawnościami maszyny wirnikowej a wyznaczanymi cechami trajektorii.

Wybrane podstawowe cechy trajektorii centralnych

Lp.	Nazwa cechy	Wartość cechy	Definicja	Algorytm	Uwagi
1.	Rząd trajektorii	liczba całkowita ≥0	rozdz. 2.4.	2012/01/2	
	Cechy traje	ektorii w dziedzinie czasu		THE T	abirea. 72
2.	Stopień okresowości, maksymalna wartość części rzeczywistej znormalizowanej funkcji autokorelacji Re $r_{zz}(\tau=T_1)$.	liczba z przedziału (0,1)	rozdz. 6.1.1.	dodatek B	
3.	Okres T ₁	liczba > 0, wyrażany w jednostkach czasu (rozdz. 2.1)	rozdz. 4.3.2.	dodatek B	
4.	Wartość Arg $r_{zz}(\tau=T_1)$.	kąt z przedz. (0, 2π) radianów	rozdz. 6.1.1.	dodatek B	1
5.	Wartość względnego odchylenia standardowego funkcji Arg u(t).	liczba z przedziału (0, 1)	rozdz. 6.1.1.	dodstek C	
6.	Całkowita moc sygnału Rzz(r=0).	liczba > 0	rozdz. 4.3.2	dodatek B	
7.	Zwrot kierunku wirowania punktu na trajektorii.	liczba z przedziału (+1,-1)	rozdz. 4.6.	Nodiitek C.	
1	Cechy trajektor	ii w dziedzinie częstotliwości	10022321412345	dodates F	101
8 do 15.	Wartości składowych dwustronnej gęstości widmowej mocy sygnału o częstotliwościach : $0.25f_n$, $0.33f_n$, $0.5f_n$, $1f_n$, $2f_n$, $3f_n$, $4f_n$ i $0.38 \div 0.46f_n$.	liczba ≥ 0	rozdz. 4.5.4.	dodatek F	A
16 do 24.	Wartości składowych dwustronnej gęstości widmowej mocy sygnału o częstotliwościach : $-0.25f_n$, $-0.33f_n$, $-0.5f_n$, $-1f_n$, $-2f_n$, $-3f_n$, $-4f_n$ i $-0.38 \div -0.46f_n$.	liczba≥0	rozdz. 4.5.4.	dodatek F	A

- 111 -

Lp.	Nazwa cechy	Wartość cechy	Definicja	Algorytm	Uwagi
25 do 30.	Wartości składowych dwustronnej gęstości widmowej sygnału o częstotliwościach równych częstotliwościom rezonansowym układu wirnik-łożyska-podpory	liczba ≥ 0	rozdz. 4.5.4	dodatek F	С
31 do 38.	Faza składowych widma amplitudowego o częstotliwościach : $0.25f_n$, $0.33f_n$, $0.5f_n$, $1f_n$, $2f_n$, $3f_n$, $4f_n$ i $0.38 \div 0.46f_n$.	kąt z przedz. (0, 2π) radianów	rozdz. 4.5.2.		В
39 do 46.	Faza składowych widma amplitudowego o częstotliwościach : $-0.25f_n$, $-0.33f_n$, $-0.5f_n$, $-1f_n$, $-2f_n$, $-3f_n$, $-4f_n$ i $-0.38 \div -0.46f_n$.	kąt z przedz. (0, 2π) radianów	rozdz. 4.5.2.	Statistics	В

Wybrane podstawowe cechy trajektorii względnych

Uwagi:

112-

A - z przedziału częstotliwości -0.38÷-0.46fn oraz 0.38÷0.46fn należy wybrać po jednej składowej o największych wartościach Sz.

B - wymaga uśredniania synchronicznego sygnału opisującego trajektorię przed wykonaniem analizy częstotliwościowej.

C - wymaga wcześniejszej identyfikacji częstotliwości rezonansowych układu wirnik-łożyska-podpory.

Tablica. 7.2

Cechy wzajemne trajektorii centralnych umożliwiające ocenianie podobieństwa dwu trajektorii, np. badanej trajektorii z trajektorią wzorcową (trajektorie wzorcowe rozdz. 4.4.3)

Lp.	Nazwa cechy	Wartość cechy	Definicja	Algorytm	Uwagi
1.	Ocena podobieństwa badanej trajektorii z trajektorią wzorcową, wartość maksymalna modułu znormalizowanej funkcji korelacji wzajemnej r _{mz} (u).	liczba z przedziału (0, 1)	rozdz. 4.4.4.	dodatek C	B
2.	Kąt względnego położenia trajektorii, $\alpha = 2\pi$ -Arg r_{mz} (υ_1) gdzie υ_1 opóźnienie dla którego funkcja r_{mz} osiąga maksimum.	liczba z przedziału (0, 2π) [rad]	rozdz. 4.4.5.	dodatek C	YB
3.	Względne odchylenie standardowe Arg u(φ).	liczba z przedziału (0, 1)	rozdz. 4.4.4.	dodatek C	
4.	Wartość opóźnienia czasowego, dla którego moduł funkcji r _{nuz} osiąga maksimum.	liczba > 0, wyrażana w sekundach lub drodze kątowej wału	rozdz. 4.4.5.		A

Uwagi.

A - wymaga synchronizacji chwili rozpoczęcia rejestracji porównywanych trajektorii sygnałem znacznika wyróżnionego położenia wału;

113

Cechy trajektorii centralnych wyznaczane na podstawie cech podstawowych podanych w tablicy 7.1

Lp.	Nazwa cechy	Wartość cechy	Definicja	Algorytm	Uwagi
1 do 8.	Wartości składowych jednostronnej gęstości widmowej sygnału o częstotliwościach : $0.25f_n$, $0.33f_n$, $0.5f_n$, $1f_n$, $2f_n$, $3f_n$, $4f_n$ i $0.38\div0.46f_n$.	liczba ≥ 0	rozdz.4.5.4	dodatek F	A
9 do 16.	Wartości składowych zastępczego dwustronnego widma amplitudowego sygnału o częstotliwościach : $0.25f_n$, $0,33f_n$, $0.5f_n$, $1f_n$, $2f_n$, $3f_n$, $4f_n$ i $0.38\div 0.46f_n$.	liczba ≥ 0	rozdz. 4.5.6	dodatek C *	A
17 do 24.	Wartości składowych zastępczego dwustronnego widma amplitudowego sygnału o częstotliwościach : $-0.25f_n$, $-0.33f_n$, $-0.5f_n$, $-1f_n$, $-2f_n$, $-3f_n$, $-4f_n$ i $-0.38 \div -0.46f_n$.	liczba ≥ 0	rozdz. 4.5.6	dodusek C	A, B
	Dla składowych widma o częstotliwościa	ch $0.25f_n$, $0.33f_n$, $0.5f_n$, $1f_n$, $2f_n$, $3f_n$,	4fn i 0.38÷0.46	fn	1725
25÷3	2. Wielkość składowej harmonicznej trajektorii.	liczba ≥ 0, wielkość względna	rozdz. 6.2.1	rozdz. 6.2.2	В
33÷4	0. Zwrot kierunku wirowania składowej harmonicznej.	współbieżny lub przeciwbieżny	rozdz. 6.2.1	rozdz. 6.2.2	В
41÷4	8. Ocena kształtu składowej harmonicznej trajektorii.	liczba z przedziału (0,1)	rozdz. 6.2.1	rozdz. 6.2.2	В
49÷5	6. Położenie kątowe składowej harmonicznej.	liczba z przedziału (0, π) radianów	rozdz. 6.2.1	Sugar Second	B, C

Uwagi.

A - z przedziału częstotliwości -0.38÷-0.46fn oraz 0.38÷0.46fn należy wybrać po jednej składowej o największych wartościach Szz.

B - wyznaczane dla składowych widma o dominujących wartościach.

C- wymaga dokładnego określenia faz składowych widma, np. z wykorzystaniem uśredniania synchronicznego.

7.3. Plan dalszych badań

Przewidywane jest zastosowanie wyników pracy do generowania nowych relacji diagnostycznych z zastosowaniem odwracania modeli (w ramach projektu badawczego realizowanego wspólnie przez Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku i Katedrę Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej).

Proces pozyskiwania reguł dla diagnostycznych systemów doradczych bazuje najczęściej na opiniach specjalistów. Trudności wynikają z potrzeby uwzględniania specyficznych cech rozpatrywanego typu obiektu, a niekiedy egzemplarza obiektu (np. wywołanych różnymi sztywnościami fundamentów). Obecnie prowadzone są prace nad bezpośrednim zastosowaniem modeli matematycznych obiektu w procesie diagnozowania stanu technicznego maszyn [48, 49]. Modele te nie występują w prostej postaci analitycznej. Najczęściej opisami działania maszyny są rozwiązania układów równań różniczkowych, możliwe do uzyskania jedynie numerycznie [5, 50, 94]. W celu zastosowania takich modeli w diagnostycznych systemach doradczych należy dokonać ich odwrócenia [25, 29, 33, 52].

Zastosowanie proponowanych w pracy ocen ilościowych umożliwi znaczną redukcję liczby uwzględnianych danych.

Przypuszcza się, że wprowadzone w pracy cechy drgań względnych wałów umożliwią tworzenie nowych relacji diagnostycznych. Przykładem mogą być zdefiniowane w pracy dwustronne widmowe gęstości mocy sygnału zespolonego, opisującego trajektorię. Zastosowanie ich do analizy sygnałów zarejestrowanych dla wybranej, typowej niesprawności maszyn wirnikowych (nadmiernego przeciążenia rozdz. 6.2.4) potwierdziło istnienie spodziewanych relacji diagnostycznych między stanem technicznym maszyny wirnikowej a cechami widma. Stwarza to możliwość budowy nowych prostych klasyfikatorów, rozpoznających niesprawności maszyn wirnikowych, opartych jedynie na analizie dominujących (wybranych) prążków w widmie.

DODATKI

se trabuse beolders cause ar piersonolo

Dodatek A. Dyskretyzacja sygnału dwuwymiarowego

Proces dyskretyzacji składa się z dwóch oddzielnych operacji: próbkowania (dyskretyzacji w dziedzinie czasu) oraz kwantowania (dyskretyzacji w dziedzinie amplitud). W wyniku próbkowania sygnału ciągłego w dziedzinie czasu otrzymuje się sygnał dyskretny. Przez sygnał dyskretny rozumie się sygnał, który określony jest jedynie w dyskretnych chwilach czasu i może być rozpatrywany jako ciąg liczb rzeczywistych.

Dyskretyzacja w dziedzinie czasu

Próbkowanie jest operacją określania chwil czasu, w których dokonywana jest estymacja wartości chwilowej sygnału analogowego. Dyskretyzacja sygnału z(t) opisującego trajektorię sprowadza się do jednoczesnego próbkowania składowych x(t) i y(t) tego sygnału.

Podczas badania maszyn wirnikowych próbkowanie realizowane jest ze stałym krokiem czasu zegarowego Δt lub ze stałym przyrostem drogi kątowej wału $\Delta \varphi$. Najczęściej dokonywana jest dyskretyzacja ze stałym krokiem czasu zegarowego. Ten sposób nie wymaga żadnej adaptacji obiektu i jest przeprowadzany za pomocą standardowej aparatury. W wyniku jednoczesnego próbkowania sygnałów składowych trajektorii x(t) i y(t) ze stałym krokiem czasu Δt otrzymuje się ciągi liczb rzeczywistych $\{x_n = x(n \cdot \Delta t)\}$ i $\{y_n = y(n \cdot \Delta t)\}$. Ciągi te są zapisywane jako ciąg uporządkowanych par liczb rzeczywistych $\{x_n, y_n\} = \{z_n\}$, stanowiący opis trajektorii.

Dyskretyzacja ze stałym przyrostem drogi kątowej wału wymaga dodatkowej adaptacji obiektu badań, umożliwiającej identyfikację wyróżnionych położeń wału. Może to realizować układ złożony z czujnika przemieszczeń względnych współpracującego z rozmieszczonymi równomiernie na obwodzie wału znacznikami (rozdz. 2.8.2). Stosowane są również układy elektroniczne generujące sygnały odpowiadające zadanej drodze kątowej wału, których działanie jest synchronizowane jednym impulsem, odpowiadającym wyróżnionemu położeniu wału. Dyskretyzacja ze stałym przyrostem drogi kątowej wału wymaga zastosowania przetwornika analogowo-cyfrowego, umożliwiającego sterowanie pobieraniem kolejnych próbek impulsami zewnętrznymi. Impulsy te generowane są w momencie przejścia kolejnych znaczników przed czołem czujnika. Takie rozwiązanie umożliwia dyskretyzację ze stałym przyrostem drogi kątowej wału.

Poddawane próbkowaniu sygnały przemieszczeń względnych są sygnałami o ograniczonym paśmie częstotliwości, co spowodowane jest między innymi właściwościami stosowanych przetworników pomiarowych i układów do pomiaru sygnałów analogowych. Częstotliwości f składowych harmonicznych sygnału spełniają więc warunek [7]: $f_{min} < f < f_{max}$, gdzie dla stosowanych układów pomiarowych przyjmuje się najczęściej $f_{min} = 0$ oraz określa się f_{max} jako najwyższą częstotliwość składowych, występujących w sygnale analogowym, odpowiadającą:

częstotliwości ograniczającej umowne pasmo przenoszenia od góry(tłumienie np. 3 dB);

częstotliwości ograniczającej pasmo przenoszenia od góry (tłumienie np. 50 dB).

W przypadku próbkowania sygnałów winny być spełnione założenia twierdzenia Kotielnikowa-Shannona o próbkowaniu w dziedzinie czasu [31, 83]. Twierdzenie to określa warunki niezbędne do otrzymania, w wyniku próbkowania, sygnału dyskretnego umożliwiającego odtworzenie sygnału ciągłego na podstawie próbek. Mogą one być zapisane w postaci następujących relacji.

Dla kroku czasu zegarowego Δt :

$$\Delta t \leq 1/(2f_{\max})$$

lub:

$$f_{\max} \le 1/(2\Delta t) = f_{\rm N} = f_{\rm S}/2$$
, (A-2)

gdzie $f_s = 1/\Delta t$ jest częstotliwością próbkowania, zaś f_N jest częstotliwością Nyquista. W praktycznych zastosowaniach przyjmuje się najczęściej $f_s \ge 2.56 f_{max}$.

Dla kroku $\Delta \varphi$ określanego jako następujący kąt obrotu wirnika [58]:

$$\Delta \varphi = 2\pi / m \tag{A-3}$$

(A-1)

liczba m próbek pobranych podczas jednego obrotu winna spełniać relację:

$$m \ge 2 \cdot f_{\max} / f_{\mathrm{n}} \,. \tag{A-4}$$

Najczęściej zaleca się [7, 31], aby pasmo częstotliwościowe sygnału było ograniczone (np. poprzez analogową filtrację filtrem dolnoprzepustowym) do zakresu częstotliwości $f \le f_{\text{max}}$ tak, by $f_{\text{N}} \ge (1.5 \div 2) f_{\text{max}}$. Niespełnienie tego warunku prowadzić może do tzw. "efektu stroboskopowego", polegającego na tym, że składowe sygnału o częstotliwościach większych od f_{N} pojawiają się w widmie jako składowe o częstotliwościach mniejszych od f_{N} .

Dyskretyzacja w dziedzinie amplitud

Kwantowaniem amplitudy sygnału dyskretnego nazywana jest operacja przypisania chwilowej amplitudzie sygnału pewnej liczby, należącej do skończonego zbioru liczb zwanych poziomami kwantyzacji. Kwantowanie amplitudy jest źródłem szumów kwantyzacji. Wpływ szumu kwantyzacji jest tym większy, im mniejsza jest liczba poziomów kwantyzacji wykorzystana do zapisu sygnału. Oznacza to, że należy maksymalnie wzmacniać sygnał analogowy przed poddaniem go dyskretyzacji tak, aby wykorzystać pełny zakres poziomów kwantyzacji przetwornika.

Wskutek kwantowania amplitudy sygnałów dyskretnych $\{x_n \mid n=0, 1,..,N-1\}$ i $\{y_n \mid n=0, 1,..,N-1\}$ otrzymuje się sygnały cyfrowe $\{x[n] \mid n=0,1,..,N-1\}$ i $\{y[n] \mid n=0,1,..,N-1\}$, będące ciągami wartości liczbowych (należących do zbioru poziomów kwantyzacji). Te dwa sygnały cyfrowe można zapisywać jako ciąg uporządkowanych par $\{\langle x[n], y[n] \rangle \mid n=0,1,..,N-1\}$, stanowiący dwuwymiarowy sygnał cyfrowy opisujący trajektorię.

Dyskretyzacji sygnałów ciągłych dokonują specjalne układy elektroniczne, zwane przetwornikami analogowo-cyfrowymi. Proces dyskretyzacji kilku sygnałów jednocześnie może być zrealizowany w dwojaki sposób. Proste przetworniki a/c składają się z jednego układu próbkującego i analogowego układu przełączającego (multiplexera), pozwalającego na cykliczne odczytanie wartości kolejnych kanałów. Występuje wówczas przesunięcie fazowe między kolejnymi kanałami. W nowoczesnych przetwornikach, w celu uniknięcia stałego przesunięcia fazowego, każdy z torów analogowych wyposażony jest w tzw. analogowy układ próbkujący z podtrzymaniem, czyli układ pamiętający wartości chwilowe sygnału [41].

Do dyskretyzacji sygnałów w ramach pracy wykorzystano przetwornik 12-bitowy (4096 poziomów kwantyzacji amplitudy), umożliwiający otrzymanie stosunku sygnał-szum około 72 dB i nie wprowadzający przesunięcia fazowego między sygnałami składowymi trajektorii.

W wyniku dyskretyzacji ciągłego sygnału dwuwymiarowego trajektoria zapisywana jest jako sygnał dyskretny dwuwymiarowy (jako ciąg par liczb opisujących chwilowe położenie środka czopa w kartezjańskim układzie współrzędnych). Sygnał dwuwymiarowy dyskretny zapisany może być jako ciąg liczb zespolonych $\{z[n]=x[n]+jy[n] \mid n=0,1,2..N-1\}$, gdzie N jest liczbą par wartości chwilowych.

Dodatek B. Algorytm wyznaczania okresu trajektorii

Opisano algorytm obliczania okresu trajektorii za pomocą funkcji autokorelacji, do której wyznaczania zastosowano przekształcenie Fouriera.

Krok 1

Równoczesne próbkowanie, ze stałym krokiem czasowym Δt , sygnałów $x_s(t)$ i $y_s(t)$, będących składowymi trajektorii niecentralnej $z_s(t)$. W wyniku próbkowania otrzymywana jest realizacja trajektorii w postaci N-elementowego ciągu par wartości liczbowych

$$\{z_{s}[n] = \langle x_{s}[n], y_{s}[n] \rangle \mid n = 0, 1, \dots N-1 \}.$$
 (B-1)

Z powodu zamierzonego zastosowania algorytmu FFT wymagane jest, aby N=2^d, gdzie d jest liczbą całkowitą. Częstotliwość próbkowania powinna być dobrana tak, aby spełnione było twierdzenie o próbkowaniu (dodatek A). Oznacza to, że musi ona być co najmniej dwukrotnie wyższa od największej częstotliwości istotnych składowych częstotliwościowego widma sygnału. Niespełnienie tego wymagania prowadzi do wyraźnego zniekształcenia trajektorii otrzymanej na podstawie szeregów czasowych. Konieczne jest również odpowiednie ograniczenie pasma sygnałów składowych przez filtrację analogową zgodnie z zasadą wynikającą z twierdzenia o próbkowaniu. Ciąg $z_s[n]$ powinien być zarejestrowany na odcinku czesu odpowiadającym kilku okresom obrotu wału.

Krok 2

Wyznaczenie wartości średnich składowych $x_s[n], y_s[n]$:

$$\overline{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N} x_s[n], \qquad \overline{y} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N} y_s[n].$$
(B-2)

Przekształcenie sygnału $z_s[n]$ do postaci odpowiadającej trajektorii centralnej, poprzez przekształcenie sygnałów składowych $x_s[n]$ i $y_s[n]$ do postaci o zerowej wartości średniej

$$x[n] = x_s[n] - \overline{x}$$
, $y[n] = y_s[n] - \overline{y}$ dla $n = 0, 1, 2....N-1$.
(B-3)

W krokach 3 do 7 wyznaczana jest funkcja autokorelacji $R_{zz}[\tau_i]$ określona dla dyskretnych wartości argumentu $\tau_i = i \Delta t$. W celu wielokrotnego skrócenia czasu obliczeń do wyznaczania funkcji autokorelacji zastosowano przekształcenie Fouriera, do wyznaczania którego wykorzystano algorytm FFT. Ciąg par wartości liczbowych $z[n] = \langle x[t], y[t] \rangle$, będący wynikiem próbkowania trajektorii traktowany, jest jako cyfrowy sygnał zespolony.

Krok 3

Uzupełnienie ciągu $\{z[n] \mid n=0,1,...N-1\}$ ciągiem N par zer, tworząc w ten sposób ciąg $\{z[n] \mid n=0,1,...2N-1\}$. Krok ten zapobiega wyznaczaniu "cyklicznej" funkcji autokorelacji [71], utrudniającej jednoznaczną identyfikację okresu trajektorii.

Krok 4

Wyznaczenie dyskretnej transformacji Fouriera ciągu $\{z[n], n=0,1,...2N-1\}$ z zastosowaniem algorytmu FFT. Wynikiem jest ciąg liczb zespolonych $\{Z[k] | k=0,1,..2N-1\}$.

Krok 5

Obliczenie niewygładzonego estymatora gęstości widmowej w postaci ciągu $\{\tilde{S}_{zz}[k] \mid k=0,1,...2N-1\}$ na podstawie wzoru:

$$\widetilde{S}_{zz}[k] = \frac{\Delta t}{N} |Z[k]|^2.$$
(B-4)

Krok 6

Wyznaczenie odwrotnej dyskretnej transformacji Fouriera ciągu { $\tilde{S}_{zz}[k]$ | k=0,1,...2N-1}, z wykorzystaniem algorytmu FFT, w postaci ciągu liczb zespolonych {p[i] | i=0,1,...2N-1}.

Krok 7

Wyznaczenie wartości funkcji korelacji w postaci funkcji dyskretnej $R_{zz}[\tau_i]$ zgodnie ze wzorem:

$$R_{zz}[\tau_i = i \cdot \Delta t] = \frac{N}{N-i} \cdot p[i]$$
 (B-5)

dla wartości i ograniczonych od przedziału od 0 do N.

Krok 8

Wyznaczenie znormalizowanej funkcji autokorelacji $r_{72}[\tau_1]$ zgodnie z (4-5).

Krok 9

Określenie maksimów lokalnych części rzeczywistej funkcji dyskretnego argumentu $r_{zz}[\tau_i]$ oraz sprawdzenie, czy odpowiadające im argumenty funkcji autokorelacji są bliskie zeru.

Krok 10

Wyznaczenie najmniejszego, powtarzającego się przedziału opóźnienia czasowego $\Delta \tau = T_1$ między kolejnymi maksimami funkcji $r_{zz}[\tau_i]$, będącego okresem podstawowym trajektorii.

Dodatek C. Algorytm identyfikacji kształtu trajektorii

Opisano algorytm umożliwiający automatyczną klasyfikację badanych trajektorii według ich podobieństwa do wybranych klas reprezentowanych w postaci trajektorii wzorcowych. Do wyznaczania ilościowego podobieństwa trajektorii zastosowano metody korelacyjnej analizy sygnałów.

Metoda polega na porównaniu badanej trajektorii kolejno z wybranymi trajektoriami wzorcowymi i określeniu, do której z nich jest ona najbardziej podobna. Dla wybranej trajektorii wynikiem identyfikacji jest zbiór liczb określających podobieństwo tej trajektorii do poszczególnych trajektorii wzorcowych.

Dla celów identyfikacji kształtu sygnał dwuwymiarowy opisujący trajektorię środka czopa będzie rozpatrywany jako funkcja drogi kątowej wału. Konieczne jest, aby obie porównywane trajektorie (badana i model) próbkowane były z jednakowym, stałym przyrostem drogi kątowej, co wymaga zastosowania układu pomiarowego opisanego w (rozdz. 2.8.2).

W rozdz. 4.4.3 opisano sposób określania zbioru trajektorii wzorcowych. Wzorce kształtu trajektorii są sygnałami dwuwymiarowymi zarejestrowanymi ze stałym odstępem drogi kątowej w postaci N-elementowego ciągu par wartości cyfrowych $\{m[n]=\langle x_m[n],y_m[n]\rangle | n=0,1,...N-1\}$. Ze względu na zastosowanie algorytmu FFT przyjęto liczność realizacji N=1024 lub N=512.

Odstęp drogi kątowej wału $\Delta \varphi$, określający chwilę pobrania kolejnych próbek sygnałów, musi spełniać wymagania wynikające z twierdzenia o próbkowaniu. Wzorce kształtu sprowadzone są do postaci, w której wartości średnie składowych, odpowiadające kierunkom pomiarowym, są równe zeru, co oznacza, że są one trajektoriami centralnymi.

Opracowany algorytm:

Krok 1

Równoczesna dyskretyzacja, ze stałym krokiem drogi kątowej wału $\Delta \varphi$, sygnałów $x_s(\varphi)$ i $y_s(\varphi)$, będących składowymi trajektorii niecentralnej $z_s(\varphi)$. W wyniku dyskretyzacji otrzymywana jest realizacja sygnału dwuwymiarowego w postaci N-elementowego ciągu par wartości cyfrowych $\{z_s[n]=\langle x_s[n], y_s[n]\rangle \mid n=0,1,...N-1\}$, próbkowanych dla drogi kątowej wału $\varphi_n=n\cdot\Delta\varphi$. Konieczne jest odpowiednie ograniczenie pasma sygnałów przez filtrację analogową zgodnie z zasadą wynikającą z twierdzenia o próbkowaniu. Długość otrzymanej realizacji sygnału powinna być kilkakrotnie większa od okresu trajektorii.

Krok 2

Przekształcenie sygnału $z_s[n]$ do postaci odpowiadającej trajektorii centralnej z[n] poprzez przekształcenie sygnałów składowych $x_s[n]$ i $y_s[n]$ do postaci o zerowej wartości średniej (B-3).

Krok 3

Wyznaczenie okresu podstawowego trajektorii, wyrażonego w drodze kątowej wału za pomocą algorytmu opisanego w (dodatek B).

Krok 4

Określenie zbioru trajektorii wzorcowych, z którymi porównywana będzie badana trajektoria. Wybór dokonywany jest głównie na podstawie wartości okresu podstawowego badanej trajektorii.

Krok 5

Pobranie trajektorii wzorcowych z bazy wzorców w postaci ciągu $\{m[n] \mid n=0,1,...N-1\}$.

W krokach 6 do 10 wyznaczana jest funkcja korelacji wzajemnej $R_{mz}[v_i]$ sygnałów m[n] i z[n], określona dla dyskretnych wartości argumentu $v_i = i \cdot \Delta \varphi$. Ciągi par wartości cyfrowych z[n] i m[n] traktowane są jako cyfrowe sygnały zespolone.

W celu wielokrotnego skrócenia czasu obliczeń do wyznaczania funkcji autokorelacji zastosowano przekształcenie Fouriera, do którego wyznaczania wykorzystano algorytm FFT.

Aby uniknąć wielokrotnego obliczania dyskretnych transformat Fouriera $\{M[k] | k=0,1,...2N-1\}$ trajektorii wzorcowych $\{m[n], n=0,1,...2N-1\}$, należy przechowywać (pamiętać) transformaty trajektorii wzorcowych.

Krok 6

Uzupełnienie ciągu $\{z[n] \mid n=0,1,...N-1\}$ ciągiem N par zer, tworząc w ten sposób ciąg $\{z[n] \mid n=0,1,...2N-1\}$. Krok ten zapobiega wyznaczaniu "cyklicznej" funkcji autokorelacji.

Krok 7

Wyznaczenie dyskretnej transformaty Fouriera ciągu $\{z[n], n=0,1,...,2N-1\}$ z zastosowaniem algorytmu FFT. Wynikiem jest ciąg liczb zespolonych $\{Z[k] | k=0,1,...,2N-1\}$.

Krok 8

Obliczenie niewygładzonego estymatora wzajemnej gęstości widmowej $\{\tilde{S}_{mz}[k] \mid k=0,1,...2N-1\}$ na podstawie ciągów $\{Z[k]\}$ i $\{M[k]\}$

$$\widetilde{S}_{mz}[k] = \frac{\Delta \varphi}{N} (M[k] \cdot Z^*[k]).$$
(C-1)

Krok 9

Wyznaczenie odwrotnej dyskretnej transformacji Fouriera ciągu { $\overline{S}_{mz}[k]$ | k=0,1,...2N-1}, z wykorzystaniem algorytmu FFT, w postaci ciągu liczb zespolonych {p[i] | i=0,1,...2N-1}.

Krok 10

Wyznaczenie wartości funkcji korelacji w postaci funkcji dyskretnej $R_{mz}[v_i]$ zgodnie ze wzorem:

$$R_{mz}[\nu_i = i \cdot \Delta \varphi] = \frac{N}{N-i} \cdot p[i]$$
 (C-2)

dla wartości i ograniczonych od przedziału od 0 do N.

Krok 11

Wyznaczenie znormalizowanej funkcji korelacji wzajemnej $r_{mz}[v_i]$ zgodnie z (4-11).

Krok 12

Wyznaczenie maksymalnej wartości modułu znormalizowanej funkcji korelacji wzajemnej $r_{mz}[v_1]$ i zapamiętanie opóźnienia czasowego $v_1 = h \cdot \Delta \varphi$.

Krok 13

Wyznaczenie argumentu funkcji korelacji dla opóźnienia odpowiadającego maksymalnej wartości modułu. Umożliwia on wyznaczenie kąta obrotu między porównywanymi trajektoriami.

Krok 14

Wyznaczenie odchylenia standardowego argumentu funkcji (4-14), przyjmującej dla dyskretnego argumentu postać:

$$u[n] = m[n] \cdot z^*[n-h], \tag{C-3}$$

gdzie n = h, h+1, ... N.

Kroki algorytmu od 5 do 14 powtarzane są dla wszystkich przyjętych wzorców kształtu. Dla trajektorii wynikiem porównywania jej kształtu z wzorcem kształtu jest zbiór trzech liczb:

- maksymalnej wartości modułu znormalizowanej funkcji korelacji wzajemnej;
- argumentu funkcji korelacji dla opóźnienia odpowiadającego maksymalnej wartości modułu;
- odchylenia standardowego argumentu funkcji u(φ).

Dodatek D. Okna czasowe danych

Stosując przekształcenie Fouriera zakładamy, że analizowane są sygnały o nieskończenie długim czasie trwania. W praktyce analizie poddawane są sygnały zarejestrowane w skończonych przedziałach czasu. Jest to przyczyną powstawania zniekształceń wyników analiz spowodowanych wpływem tak zwanych okien czasowych.

Problem okien czasowych danych zostanie omówiony w pierwszej kolejności dla sygnałów rzeczywistych. Zagadnienie to w odniesieniu do sygnałów rzeczywistych jest szczegółowo omawiane w wielu pozycjach literatury [31, 71]. Następnie problem okien zostanie omówiony dla sygnałów zespolonych. Do rozwiązania problemu wykorzystano informacje o wpływie okien na wynik analiz sygnałów rzeczywistych.

Wpływ okien czasowych danych na wyniki analiz sygnałów rzeczywistych

Sygnał rzeczywisty x(t) jest obserwowany w skończonym przedziale czasu [-T/2, T/2]. Zastosowanie przekształcenia Fouriera wymaga założenia, że rozpatrywany jest sygnał o nieskończenie długim czasie trwania. Dla spełnienia tego założenia przyjmuje się, że wartości chwilowe amplitudy sygnału są równe zeru poza rozpatrywanym odcinkiem czasu o długości T(rys. D.1). Założenie to jest równoważne przyjęciu pewnej funkcji wagi u_T , która w tym przypadku ma postać prostokąta i zwana jest oknem prostokątnym w dziedzinie czasu

$$u_{\rm T}(t) = 1 \, {\rm dla} \, -T/2 \le t < T/2 \, {\rm i}$$

$$u_{\Gamma}(t) = 0 \text{ dla } t < -T/2 \text{ lub } t \ge T/2.$$

Podrealizacja sygnału x(t), będąca wynikiem obserwacji w dziedzinie czasu, może być uznana za wynik mnożenia przebiegu czasowego o nieograniczonym czasie trwania przez prostokątną funkcję okna $u_{\rm T}(t)$ (rys. D.1). Zastosowanie okna danych w dziedzinie czasu oznacza mnożenie sygnału x(t) przez prostokątną funkcję okna $u_{\rm T}$:

$$x_1(t) = x(t) \cdot u_T(t)$$
. (D-2)

(D-1)

W wyniku tego wyodrębniona została podrealizacja $x_1(t)$ sygnału x(t).



Rys. D.1. Interpretacja realizacji sygnału o ograniczonym czasie trwania [7] Fig. D.1. Interpretation of the signal realisation with limited time [7]

Funkcję okna prostokątnego u_T oraz jej transformatę Fouriera U_T pokazano na rys. D.2 [16]. Funkcja okna w dziedzinie czasu jest parzystą funkcją rzeczywistą, co powoduje, że jej transformata składa się tylko z części rzeczywistej.

Mnożeniu w dziedzinie czasu sygnału x(t) przez funkcję okna $u_{T}(t)$, w dziedzinie częstotliwości odpowiada splot widma sygnału analizowanego na nieskończenie długim odcinku czasu X(t) (będącego funkcją zespoloną) z transformatą okna $U_{T}(t)$

$$X_1(f) = X(f) * U_T(f).$$
 (D-3)

W wyniku tego splotu w widmie analizowanego sygnału powstaje wiele wstęg bocznych wokół lokalnych dominant oraz przeciek mocy z dominujących składowych do składowych sąsiednich. Utrudnia to poprawną interpretację otrzymanych wyników analiz.



Rys. D.2. Prostokątne okno danych w dziedzinie czasu i częstotliwości Fig. D.2. Rectangular time weighting function in time and frequency domain

Dla sygnałów rzeczywistych wpływ ten został dokładnie zbadany i opisany w literaturze [7, 67]. Efekty te występują w różnych formach dla wszystkich metod wyznaczania widm przy skończonym czasie analizy.

Redukcji wpływu okna na wyniki analiz poświęcono wiele prac [71], a rozwiązania różnią się w zależności od metody obliczania widma i założeń co do charakteru danych. Stosowane są okna o specjalnej postaci, np. popularne są okna : Hanninga, Kaisera-Bassela i "Flat Top".

Wpływ okien czasowych danych na wyniki analiz sygnałów zespolonych

Sygnał zespolony z(t) obserwowany w skończonym przedziale czasu [-T/2, T/2] tworzy podrealizację $z_1(t)$. W celu jej wyodrębnienia zarówno część rzeczywistą, jak i urojoną sygnału z(t) należy pomnożyć przez funkcję okna $u_T(t)$, gdzie u_T jest funkcją rzeczywistą

$$z_1(t) = \operatorname{Re}(z(t)) \cdot u_T(t) + j \operatorname{Im}(z(t)) \cdot u_T(t).$$

Powyższe równanie można sprowadzić do postaci:

$$z_1(t) = (Re(z(t)) + j \operatorname{Im}(z(t))) \cdot u_T(t) = z(t) \cdot u_T(t).$$
(D.5)

W dziedzinie częstotliwości mnożeniu temu odpowiada splot widma sygnału analizowanego na nieskończenie długim odcinku czasu Z(f) z transformatą okna

$Z_1(f) = Z(f) * U_T(f).$

Tak jak dla sygnałów rzeczywistych, transformata sygnału zespolonego Z(f), będąca funkcją zespoloną, jest splatana z transformatą okna $U_{\rm T}(f)$, będącą funkcją rzeczywistą. Oznacza to, że wpływ okien w przypadku analizy sygnałów zespolonych jest podobny jak w przypadku analizy sygnałów rzeczywistych.

W wyniku splotu w widmie analizowanego sygnału zespolonego powstaną wstęgi boczne wokół lokalnych dominant oraz przeciek mocy z dominujących składowych do składowych sąsiednich. Opierając się na powyższych rozważaniach można stwierdzić, że podczas analizy sygnałów zespolonych pozostają aktualne znane zalecenia dotyczące stosowania okien czasowych dla sygnałów jednowymiarowych rzeczywistych [31, 71].

W trakcie doboru odpowiedniego okna należy wziąć po uwagę typ analizowanego sygnału oraz cel prowadzonej analizy. W dalszej części pracy do wyznaczania widma mocy stosowano okno Hanninga lub Flat Top.

Okno Hanninga ma wiele istotnych zalet w porównaniu z oknem prostokątnym i jest najczęściej stosowane w analizie częstotliwościowej. Podczas gdy tłumienie amplitudy pierwszej wstęgi bocznej wynosi dla okna prostokątnego 13 dB, to dla okna Hanninga otrzymuje się 32 dB. Tłumienie dla kolejnych wstęg bocznych w przypadku okna prostokątnego wynosi 20 dB na dekadę częstotliwości, zaś dla okna Hanninga 60 dB. Należy zwrócić również uwagę na to, że szerokość okna widmowego Hanninga jest o 50% większa niż okna prostokątnego, co oznacza, że dla okna Hanninga następuje zmniejszenie rozdzielczości częstotliwościowej.

Z punktu widzenia celu prowadzonych analiz najlepszym rozwiązaniem może być często zastosowanie okna Flat Top. Analizowane w pracy sygnały zespolone, opisujące trajektorie ruchu czopa w łożysku ślizgowym, w większości przypadków składają się z kilku (często jednej) składowych harmonicznych 0 dominujących amplitudach na tle szumu szerokopasmowego o niewielkiej amplitudzie. Z punktu widzenia diagnostyki technicznej celem analizy częstotliwościowej takich sygnałów jest najczęściej dokładne określenie amplitud dominujących składowych. Stosując analizę o odpowiednio dużej rozdzielczości częstotliwościowej (umożliwiającą dokładną identyfikację częstotliwości składowych widma) dokładne określenie amplitudy lub mocy sygnału w określonym paśmie umożliwia zastosowanie okna Flat Top. Stosowanie tego okna wymaga jednak stałej kontroli czy w istotnych składowych o niewiele różniacych analizowanym sygnale піе ma sie częstotliwościach. W takim przypadku zastosowanie okna Flat Top może spowodować, że składowe te w widmie będą reprezentowane przez jeden prążek.

Przy stosowaniu cyfrowych metod analizy sygnałów uwzględnianie wpływu funkcji okna może mieć miejsce w dziedzinie czasu lub częstotliwości. W pracy funkcję okna stosowano w dziedzinie czasu. Składowe x(n) i y(n) sygnału dyskretnego z(n), gdzie n = 0, 1, ..., N-1, są mnożone przez wartości liczbowe okna w_T wyliczone dla funkcji okna w N chwilach czasu oddalonych od siebie o odstęp $\Delta t=T/N$, gdzie T jest szerokością okna w dziedzinie czasu. W przypadku okna Hanninga wpływ okna uwzględniano w dziedzinie częstotliwości (dodatek F). Na zakończenie należy przypomnieć, że niezastosowanie jawnie żadnego okna jest równoważne z zastosowaniem okna prostokątnego.

1.0219

Dodatek E. Blędy estymacji gęstości widmowych sygnalu zespolonego

W punkcie tym omawiane są odchyłki estymacji, związane z wyznaczaniem widmowych gęstości mocy sygnałów zespolonych cyfrowo. Ponadto dyskutowane są środki redukcji błędów, bazujące na odpowiednim uśrednianiu prążków widma lub widm.

Przy założeniu, że z(t) jest sygnałem losowym o rozkładzie normalnym, wartości Z(f,t) są liczbami zespolonymi, których części rzeczywiste i urojone mogą być rozpatrywane jako nieskorelowane zmienne losowe o rozkładzie normalnym [7]. Stąd wielkość $|Z(f,t)|^2$ jest sumą kwadratów dwóch niezależnych zmiennych losowych o rozkładzie normalnym. Wynika stąd, że:

- każda składowa częstotliwościowa estymatora dwustronnej gęstości widmowej S_{zz}(f), określanej zależnością (4-30), ma rozkład χ² o n = 2 stopniach swobody;
- każda składowa częstotliwościowa estymatora jednostronnej gęstości widmowej G_{zz}(f), określanej zależnością (4-31), ma rozkład χ² o n = 4 stopniach swobody.

Przedłużenie czasu obserwacji nie powoduje zmiany funkcji rozkładu, określającej wariancję estymatora, przez co estymator ten nie jest estymatorem zgodnym.

Odchylenie standardowe estymatorów, będące oceną składnika losowego błędu estymacji, przy zastosowaniu okna prostokątnego można wyznaczyć podobnie jak dla sygnałów rzeczywistych [7, 71] z zależności:

$$\varepsilon = \frac{\sigma\{\hat{G}_z(f)\}}{G_z(f)} = \sqrt{\frac{2}{n}}.$$
 (E-1)

Wariancja estymatora dwustronnej gęstości widmowej $\varepsilon = 1$ (dla n = 2), natomiast wariancja jednostronnej gęstości widmowej $\varepsilon \approx 0.7$ (dla n = 4).

Dla przewidzianych w pracy zastosowań prowadzonej analizy tak duże względne odchylenie standardowe jest niedopuszczalne. Dąży się do zwiększenia liczby *n* stopni swobody estymatora gęstości widmowej poprzez [28]:

- zastosowanie odpowiedniego okna widmowego;
- prowadzenie tzw. wygładzania w zbiorze estymatorów;
- wygładzanie częstotliwościowe estymatora.

Wzór (E-1) wyprowadzono przy założeniu, że zastosowano okno prostokątne. Zastosowanie innego okna widmowego powoduje zmianę liczby stopni swobody n, która jest zależna od efektywnej szerokości szumowej zastosowanego okna B_w .

Wygładzanie w zbiorze estymatorów polega na uśrednianiu estymatorów gęstości widmowej i odbywa się kosztem wydłużenia czasu analizy. Uśrednianie wartości k estymatorów powoduje k-krotne zwiększenie liczby stopni swobody.

Wygładzanie częstotliwościowe polega na uśrednieniu sąsiadujących ze sobą "prążków" gęstości widmowej i odbywa się kosztem zmniejszenia rozdzielczości częstotliwościowej. Uśrednienie m kolejnych prążków powoduje m-krotne zwiększenie liczby stopni swobody.

Podobnie jak dla sygnałów rzeczywistych [31, 7] ostateczną liczbę n stopni swobody w przypadku wyznaczania dwustronnej gęstości widmowej można określić jako :

$$n = 2 \cdot k \cdot m \cdot B_{w} \cdot T \tag{F2}$$

oraz w przypadku wyznaczania jednostronnej gęstości widmowej można określić jako :

$$n = 4 \cdot k \cdot m \cdot B_{w} \cdot T, \tag{E-3}$$

gdzie:

 k- liczba estymatorów gęstości widmowej, zastosowanych do wygładzania w zbiorze estymatorów;

m-liczba "prążków" gęstości widmowej, uśredniana podczas wygładzania częstotliwościowego;

B_w - efektywna szerokość szumowa zastosowanego okna widmowego, wyrażona w [Hz];

T - czas obserwacji realizacji sygnału, wyrażony w sekundach.

Często stosowaną i uważaną za najlepszą ocenę statystyczną (uwzględniającą wariancję estymatora) jest ocena wykorzystująca przedziały ufności dla gęstości widmowej, określona następująco [31, 71]:

$$\frac{n \cdot \hat{G}_{z}(f)}{C(n; \alpha/2)} \le G_{z}(f) < \frac{n \cdot \hat{G}_{z}(f)}{C(n; 1 - \alpha/2)},$$
(E-4)

gdzie $C(n; \alpha)$ jest kwantylem rozkładu χ^2 o *n* stopniach swobody i poziomie istotności równym α .

Dodatek F. Algorytm wyznaczania widmowych gęstości mocy

Poniżej przedstawiono algorytm wyznaczania wygładzonych estymatorów jednostronnej i dwustronnej gęstości widmowej mocy sygnału zespolonego, opisującego trajektorię.

Krok 1

Dyskretyzacja sygnału o paśmie ograniczonym przez filtrację analogową. W wyniku dyskretyzacji otrzymywanych jest H realizacji sygnału zespolonego w postaci Nelementowego ciągu par wartości cyfrowych $\{z_h[n] \mid n=0,1,...N-1, h=1,2,...H\}$. Odcinki czasu, w których zarejestrowano ciągi $\{z_h[n]\}$, muszą być rozłączne. Z powodu zastosowania algorytmu FFT wymagane jest, aby $N=2^p$, gdzie p jest liczbą całkowitą. W pracy w większości przypadków przyjęto N=1024 (czyli p=10). Wynikało to z kompromisu między długością czasu rejestracji a wymaganą rozdzielczością częstotliwościową analiz (oraz ograniczeniami realizacji algorytmu na komputerze klasy IBM PC).

Krok 2

W celu zmniejszenia "przecieku", spowodowanego ograniczoną długością podrealizacji sygnału cyfrowego, w pracy stosowano okna Hanninga lub Flat Top. Okno Flat Top zastosowano w dziedzinie czasu, a okno Hanninga w dziedzinie częstotliwości. W celu zastosowania okna Flat Top składowe sygnału dyskretnego $z_h[n]$, $\{x_h[n] \mid n=0,1,...N-1\}$ i $\{y_h[n] \mid n=0,1,...N-1\}$ są mnożone przez odpowiednie wartości liczbowe funkcji okna w_T

$$w_T[n] = 1 - 1.93 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot n/N) + 1.29 \cdot \cos(4 \cdot \pi \cdot n/N)$$

$$= 0.388 \cdot \cos(6 \cdot \pi \cdot n/N) = 0.0322 \cdot \cos(8 \cdot \pi \cdot n/N)$$
(F-1)

wyliczone dla N chwil czasu. W przypadku zastosowania okna Hanninga wpływ okna uwzględniono w kroku 4.

Krok 3

Wyznaczenie z ciągu $\{z_h[n], n=0,1,...,N-1\}$ dyskretnej transformacji Fouriera opisanej wzorem (4-34) za pomocą algorytmu FFT w postaci ciągu liczb zespolonych

$$Z_h[m] = \operatorname{Re} Z_h[m] + j \cdot \operatorname{Im} Z_h[m], \qquad (F-2)$$

gdzie m=0,1,...,N-1.

Krok 4

Jeżeli wcześniej krok 2 algorytmu pominięto w celu ograniczenia "przecieku", należy zastosowć funkcję okna Hanninga. Okno to uwzględniono w dziedzinie częstotliwości. Zgrubne wygładzanie w celu zmniejszenia skutków przecieku wykonano za pomocą cyklicznego splotu transformaty funkcji okna Hanninga z częścią rzeczywistą i urojoną widma $Z_h[m]$ zgodnie ze wzorami [7]:

$$\operatorname{Re}Z_{h}[m] := 0.5 \cdot (\operatorname{Re}Z_{h}[m] + 0.5 \cdot (\operatorname{Re}Z_{h}[m+1] + \operatorname{Re}Z_{h}[m-1]))$$

oraz

$$ImZ_{h}[m] := 0.5 \cdot (ImZ_{h}[m] + 0.5 \cdot (ImZ_{h}[m+1] + ImZ_{h}[m-1])).$$
(F-4)

Krok 5

Z powodu przyjęcia granic sum zgodnie ze wzorami (4-34) i (4-35), co umożliwia bezpośrednie zastosowanie FFT, dyskretne widmo zespolone określone dla dyskretnych częstotliwości f_k , zdefiniowane wzorem (4-36) w postaci ciągu $\{Z_h[f_k]\}$, należy wyznaczyć ze wzoru:

$$Z_h[f_k] = Z_h[m] \tag{F-5}$$

dla $f_k = \Delta f k$, gdzie

 $k = m \operatorname{dla} 0 \le m < N/2 \text{ oraz } k = (m-N) \operatorname{dla} N/2 \le m < N-1,$ (F-6)

a Δf jest rozdzielczością częstotliwościową.

Krok 6

Obliczenie, zgodnie ze wzorami (4-30) i (4-31), zgrubnych (po wstępnym wygładzaniu) estymatorów gęstości widmowych $\tilde{S}_{zz,h}[f_k]$ i $\tilde{G}_{zz,h}[f_k]$ dla dyskretnych częstotliwości spełniających warunek $|f_k| < f_N$, gdzie f_N - jest częstotliwością Nyquista (dodatek D), co uwarunkowane jest charakterystyką częstotliwościową filtrów analogowych, stosowanych w celu ograniczenia pasma sygnału przed poddaniem go dyskretyzacji.

Krok 7

Przeprowadzenie wygładzania estymatorów. Zgodnie z dodatkiem E wygładzanie może być realizowane w dziedzinie czasu (wygładzanie w zbiorze estymatorów) lub w dziedzinie częstotliwości (uśrednianie sąsiednich składowych widma). Ponieważ analizowane w pracy sygnały można rejestrować na stosunkowo długich odcinkach czasu (na których można przyjąć, że są one stacjonarne), a ograniczenia długości czasu rejestracji (czyli długości ciągów $\{z_h[n]\}$) przyjęto głównie ze względu na realizowalność procedury FFT na komputerze klasy PC, zastosowano uśrednianie w dziedzinie czasu zgodnie ze wzorem:

$$\hat{S}_{ZZ}[f_k] = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^{H} \widetilde{S}_{ZZ,h}[f_k].$$
 (F-7)

Krok 8

Ostateczne określenie liczby n stopni swobody gęstości widmowych zgodnie ze wzorami (E-2) i (E-3) z uwzględnieniem rodzaju zastosowanego okna i liczby H uśrednianych estymatorów gęstości widmowych.

Krok 9

Obliczenie przedziałów ufności zgodnie ze wzorem (E-4).

Dodatek G. Kryteria oceny stanu maszyn wirnikowych na podstawie przemieszczeń względnych wałów

Poniżej omówiono stosowane obecnie normy i zalecenia dotyczące oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych na podstawie wyników pomiarów drgań względnych wałów w kierunku promieniowym.

Wykaz stosowanych obecnie norm i zaleceń oceny stanu maszyn wirnikowych

W tablicy G.1 zamieszczono wykaz norm i zaleceń oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych na podstawie drgań bezwzględnych obudów łożysk i drgań względnych czopa wału w łożysku.

Normy wykorzystujące cechy sygnałów drgań bezwzglednych obudów łożysk

VDI 2056 : Evaluation standards for mechanical vibrations in machines.

ISO 2372 / 1974 : Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s.

DIN-ISO 3945 : Mechanical vibrations in large rotating machines with speeds between 10 s⁻¹ and 200 s⁻¹.

ISO 2372 : Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurement on nonrotating parts.

Part 1 : General guidelines.

Part 2 : Large steam turbine generator sets.

Part 3 : Guidelines for rotating machines with nominal power between 30 kW and 50 MW and nominal speeds between 1 and 200 rev/s when measured in situ.

Normy wykorzystujące cechy sygnałów drgań wzglednych wałów

VDI 2059 : Shaft vibrations in turbo-sets.

Part 1: Shaft vibrations in turbo-sets. Basis for measurement and evaluation.

Part 2: Shaft vibrations in power plant turbo-sets. Measurement and evaluation.

Part 3: Shaft vibrations in industrial turbo-sets. Measurement and evaluation.

Part 4: Shaft vibrations in gas turbo-sets. Measurement and evaluation.

Part 5: Shaft vibrations in hydro-electric machines. Measurement and evaluation.

ISO 7919 : Mechanical vibration of non-reciprocating machines - Measurement on rotating shafts and evaluation.

Part 1: General guidelines.

Part 2: Guidelines for large steam turbine generator sets.

Part 3: Guidelines for coupled industrial machines.

Part 4: Guidelines for gas turbines.

Part 5: Guidelines for hydraulic machines sets.

API std.670: Vibration, Axial Position and Bearing Temperature Monitoring Systems.
API std. 541 : Form-wound squirrel-cage induction motors - 250 horsepower and larger.
API std. 561 : Form-wound brushless synchronous motors.
API std. 611 : General-Purpose Steam Turbines for Refinery Service.
API std. 612 : Special-Purpose Steam Turbines for Refinery Service.
API std. 617 : Centrifugal Compressors for Refinery Services.

Kryteria oceny drganiowych stanów turbin zamieszczone w normie VDI 2059

Omówione zostaną kryteria oceny stanu maszyn wirnikowych sformułowane na podstawie przemieszczeń drgań wału względem panewki łożyska,mierzonych w kierunku promieniowym. Wielkością, na podstawie której budowane są kryteria oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych, zawarte w normie VDI 2059, jest "maksymalne przemieszczenie wału", oznaczane przez s_{max} . Jego sposób wyznaczania opisano w rozdz. 3.3.2. Jest to obecnie jedyna szeroko stosowana wielkość wyznaczana na podstawie trajektorii, będąca oceną punktową sygnału dwuwymiarowego przemieszczeń względnych środka czopa.

Wykaz norm i zaleceń oceny stanu technicznego	maszyn wirnikowych [20]
---	-------------------------

Oceny na podstawie drgań bezwzględnych obudowy łożyska			Oceny na podstawie drgań względnych czopa wału w łożysku			
Wymagania dla maszyn nowych i oddawanych po remoncie	Oceny stanu dokonywane podczas działania maszyny	Oceny stanu dokonywane przez układy ciągłego monitorowania	Wymagania dla maszyn nowych i oddawanych po remoncie	Oceny stanu dokonywane podczas działania maszyny	Oceny stanu dokonywane przez układy ciągłego monitorowania	
VDI 2056 Grupa К / М	VDI 2056 wszystkie Grupy		API 541	VDI 2059 -1 VDI 2059 -2 VDI 2059 -2	VDI 2059 -2 VDI 2059 -3	
ISO 2372/1974	ISO 2372/1974	人名 机 金田 段	AFI 540	VDI 2059 -5	VDI 2039 -4	
Class I / II	Klasy I ÷IV		API 611	VDI 2059 -5	150 7919 -1	
DIN 45665	DIN / ISO 3945	())手型())	API 612	ISO 7919 -1	ISO/DIS 7919 - 2 ISO/DIS 7919 - 3	
DIN / ISO 2373			API 617	ISO/DIS 7919 - 3	ISO/DIS 7919 - 4	
IEC 34-14	111111			130/D13 /919 - 4		
CEN HD 347	111111					
Normy możliwe do zastosowania z ograniczeniami API 541 API 546	Normy możliwe do zastosowania z ograniczeniami ISO 2372 - 1+3	Normy możliwe do zastosowania z ograniczeniami ISO 2372 - 1+3	ality of the second	Normy możliwe do zastosowania z ograniczeniami ISO 7919 - 5	Normy możliwe do zastosowania z ograniczeniami ISO 7919 - 5	

Kryteria oceny stanu dynamicznego turbin na podstawie "maksymalnego przemieszczenia drgań" s_{max} zamieszczone w normie VDI 2059 rozróżniają trzy drganiowe stany maszyny: normalny, alarmowy oraz stan wymagający natychmiastowego zatrzymania maszyny.

Stan drganiowy turbiny można uznać za normalny, gdy ogólny stan techniczny maszyny jest dobry, a warunki, w jakich działa, można uznać za poprawne. Wyznaczona wówczas wartość s_{max} w danej płaszczyźnie pomiarowej nazywana jest normalnym poziomem drgań. Normalne poziomy drgań dla poszczególnych łożysk mogą być różne i powinny być określone przez producenta.

Wystąpienie stanu alarmowego świadczy o wyraźnym pogorszeniu się stanu dynamicznego maszyny. Wówczas konieczne staje się określenie przyczyn wzrostu drgań, a następnie podjęcie działań w celu ich zmniejszenia lub decyzji o wyłączeniu maszyny. Po przekroczeniu poziomu drgań alarmowych turbina powinna pracować pod ciągłym nadzorem drganiowym.

Poniżej przedstawione zostaną kryteria oceny drganiowego stanu turbin na podstawie normy VDI 2059. Kryteria te zostały opracowane wyłącznie dla ustalonych warunków działania turbin.

Turbiny parowe stosowane do napędu generatorów

Do ustalenia stanu alarmowego turbiny parowej zgodnie z normą VDI 2059 część 2 wymagana jest znajomość normalnego poziomu drgań maszyny. Z doświadczeń wynika, że wartość tego poziomu dla poszczególnych łożysk turbiny jest różna. Zależy ona również od warunków działania maszyny. Z tego powodu normalne poziomy drgań powinny być określane osobno dla poszczególnych łożysk oraz dla warunków działania turbiny (takich jak temperatura i ciśnienie pary, obciążenie) zawartych w pewnych przedziałach.

O zaistnieniu stanu alarmowego decyduje przyrost wartości s_{max} ponad normalny poziom drgań. Wymagana wartość przyrostu s_{max} zależy od nominalnej prędkości obrotowej turbiny i przedstawia się następująco:

- 43 μm dla prędkości obrotowej 1000 min-1
- 40 μm dla prędkości obrotowej 1500 min-1
- 38 µm dla prędkości obrotowej 1800 min-1
- 30 µm dla prędkości obrotowej 3000 min-1
- 26 µm dla prędkości obrotowej 3600 min⁻¹.

Kryterium pozwalające stwierdzić, że turbina osiągnęła stan drganiowy wymagający natychmiastowego jej zatrzymania, ilustruje wykres na rys. G.1. Kryterium to można stosować tylko wówczas, jeżeli producent turbiny nie ustalił mniejszych wartości krytycznych.

Turbiny parowe stosowane w przemyśle

Do oceny stanu dynamicznego parowych turbin przemysłowych norma VDI 2059 część 3 podaje dwa równoważne kryteria. Pierwsze kryterium stosowane jest wtedy, gdy brak informacji na temat właściwości drganiowych turbiny, a w szczególności, gdy nie są znane

normalne poziomy drgań. Wówczas stan drganiowy turbiny oceniany jest na podstawie bezwzględnych wartości "maksymalnego przemieszczenia wału" s_{max} zgodnie z wykresem pokazanym na rys. G.2. Przedstawione na nim graniczne poziomy drgań w funkcji maksymalnej nominalnej prędkości obrotowej wału odpowiadają następującym stanom drganiowym:

linia A - stan normalny,

- B stan alarmowy,
- C stan wymagający natychmiastowego zatrzymania maszyny.



Rys. G.1. Wartości graniczne oceny stanu drganiowego turbin zawodowych na podstawie VDI 2059 część 2

Fig. G.1. Limit values of vibration condition assessment of power plant turbo-sets on the basis of VDI 2059 Part 2

Drugie kryterium, określające stan alarmowy turbiny, stosowane jest wówczas, gdy normalny poziom drgań dla danych warunków działania jest wielkością znaną o stałej wartości nie zmieniającej się w czasie eksploatacji maszyny. Obserwowana jest zmiana wartości "maksymalnego przemieszczenia drgań" s_{max} w stosunku do poziomu normalnego, która porównywana jest z poziomem alarmowym $s_{max,B}^*$, którego wartość należy wybrać jako mniejszą z wielkości

$$s_{\max,B}$$
 lub $(s_{\max,N} \cdot 0.25 \cdot s_{\max,B}),$ (G-1)

gdzie:

 $s_{\max,N}$ - oznacza typowy, powtarzalny poziom drgań znany z poprzednich pomiarów dla obecnych warunków pracy turbiny;

 $s_{\max,B}$ - jest maksymalnym przemieszczeniem wału zależnym od nominalnej prędkości obrotowej turbiny wyznaczonym z linii B na rysunku G.2.



Nominalna prędkość obrotowa [obr⁻¹]

- Rys. G.2. Wartości graniczne oceny stanu drganiowego parowych turbin przemysłowych na podstawie VDI 2059 część 3
- Fig. G.2. Limit values of vibration condition assessment of industrial turbo-sets on the basis of VDI 2059 Part 3

W zależności od wartości $s_{\max,N}$ maksymalne drgania wału dopuszczane przez poziom alarmowy $s^*_{\max,B}$ mogą być mniejsze lub równe poziomowi drgań alarmowych wyznaczonych względem poprzedniego kryterium. Oznacza to, że drugie kryterium jest bardziej rygorystyczne, oceniające stan drganiowy maszyny jako alarmowy wcześniej niż kryterium pierwsze.

Przemysłowe turbiny gazowe

Stan drganiowy turbin gazowych oceniany jest na podstawie bezwzględnej wartości s_{max} zgodnie z wykresem przedstawionym na rys. G.3. Przedstawione na nim graniczne poziomy drgań w funkcji maksymalnej nominalnej prędkości obrotowej wału odpowiadają następującym stanom drganiowym:

linia I - stan alarmowy,

II - stan wymagający natychmiastowego zatrzymania maszyny.



Nominalna prędkość obrotowa [obr⁻¹]

- Rys. G.3. Wartości graniczne oceny stanu drganiowego turbin gazowych na podstawie VDI 2059 część 4
- Fig. G.3. Linit values of vibration condition assessment of gas turbines on the basis of VDI 2059 Part 4

Kryteria oceny drganiowych stanów maszyn wirnikowych względem norm API

Wytyczne API przeznaczone są do oceny maszyn nowych lub po remoncie. Podają one graniczne wartości międzyszczytowych amplitud drgań, dla których stan drganiowy maszyny uznać można za dobry. Wielkością, na podstawie której budowane są kryteria zawarte w normach API, jest równoważna podwójna amplituda drgań względnych A_{p-p}, będąca wartością większą spośród dwóch amplitud międzyszczytowych wyznaczanych dla sygnałów przemieszczeń względnych zarejestrowanych w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach pomiarowych.

Prowadzenie obserwacji drgań jednym czujnikiem przemieszczeń względnych dostarcza informacji o drganiach czopa w kierunku odpowiadającym kierunkowi osi czujnika. Kryteria oparte na wynikach pomiarów drgań względnych w jednym kierunku najczęściej wymagają założenia, że kierunek pomiaru pokrywa się z kierunkiem maksymalnych drgań wału, co jest przyczyną dużych niedokładności ocen formułowanych na ich podstawie.

Dla turbin parowych w normach API-611 i API-612 zaleca się, aby równoważna podwójna amplituda drgań względnych A_{p-p} nie przekraczała mniejszej z wartości zamieszczonej w tablicy G.2 lub obliczonej ze wzoru:

$$25.4 \cdot \sqrt{\frac{12000}{n[obr / min]}}$$
 [µm]. (G-2)

Tablica G.2

Wartości graniczne przemieszczeń względnych wału względem norm API 612

Nominalna prędkość obrotowa n [obr./min]	Równoważna podwójna amplituda drgań względnych A _{p-p} [μm]		
≤ 4000	50.8		
4001 ÷ 6000	38.1		

Dla turbin gazowych w normie API-616 zaleca się, aby równoważna podwójna amplituda drgań względnych A_{p-p} nie przekraczała wartości zamieszczonej w tablicy G.3.

Tablica G.3

Wartości graniczne przemieszczeń względnych wału względem norm API 616

Nominalna prędkość obrotowa n [obr./min]	Równoważna podwójna amplituda drgań względnych Ap-p [µm]		
< 4000	50.8		
4000 ÷ 8000	38.1		
8001 ÷12000	25.4		
> 12000	12.7		

Dla sprężarek wirnikowych norma API-617 zaleca się, aby równoważna podwójna amplituda drgań względnych A_{p-p} (będąca wynikiem drgań i bicia) nie przekraczała wartości obliczonej ze wzoru:

drgania + bicie =
$$25.4 \cdot \left(\sqrt{\frac{12000}{n[obr./min]}} + 0.25 \cdot \sqrt{\frac{12000}{n[obr./min]}} \right)$$
 [µm]. (G-3)

LITERATURA

- API std. 617 : Centrifugal Compressors for Refinery Services. American Petroleum Institute, Washington D.C.20037.
- [2] API std. 611 : General-Purpose Steam Turbines for Refinery Service. American Petroleum Institute, Washington D.C.20037.
- [3] API std. 612 : Special-Purpose Steam Turbines for Refinery Service. American Petroleum Institute, Washington D.C.20037.
- [4] API std.670: Vibration, Axial Position and Bearing Temperature Monitoring Systems, 2nd Ed. American Petroleum Institute, Washington D.C.
- [5] Barwell F.T.: Łożyskowanie. WNT, Warszawa 1984.
- [6] Batko W., Petko M.: Implementacja na procesorze sygnalowym filtru Kalmana dla eliminacji zaburzeń w systemach monitorujących. Materiały III Krajowej Konferencji Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów. Szczyrk, październik 1995, ss. 35+42.
- [7] Beauchamp K.G.: Przetwarzanie sygnałów metodami analogowymi i cyfrowymi. WNT, Warszawa 1978.
- [8] BENTLY NEVADA: 9000 Monitoring System. Minden, 1993.
- [9] BENTLY NEVADA: Catalog. Rotating Machinery Information System and Services. Minden, 1990/91.
- [10] BENTLY NEVADA: Rotor Kit. Applications Note. Minden, 1992.
- [11] BENTLY NEVADA: How to minimize electrical runout during rotor manufacturing. Applications Note. Minden, 1979.
- [12] BENTLY NEVADA: Dual Probe Varsus Shaft Rider. Applications Note. Minden, 1987.
- [13] Bently D.E.: Compensation of rotor dynamic motion data when probes are not installed at 90 degrees and how to rotate coordinate systems. Orbit, Vol. 10, No.1, April 1989, s.3+5.
- [14] Bently E., Thomson A.: Detection of cracks in rotors. Materiały Third EPRI Incipient Failure Detection Conference. Philadelphia, March 1987.
- [15] Bently D.E., Zimmer S., Palmatier G.E., Muszynska A.:Interpreting vibration information from rotating machinery. Sound and Vibration, Feb. 1986.
- [16] Bracewell R.: Przekształcenie Fouriera i jego zastosowania. WNT, Warszawa 1968.
- [17] Bucher I., Ewins D., Gröll G., Schmiechen P.: Directional and multi-dimensional spectrograms and Campbell diagrams: A diagnostic and surveillance tool for rotating machinery. 2-nd International Symposium "Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, Senlis october 1995, s.291÷302.
- [18] CARL SCHENCK AG Postępowe metody i nowoczesne przyrządy, obniżające koszty utrzymania maszyn. Materiały szkoleniowe, , Darmstadt 1.

- [19] CARL SCHENCK AG: Vibrocontrol 5000. The Machine Monitoring System. Darmstadt, 1995.
- [20] CARL SCHENCK AG: Methods, Applications and Solutions for Conventional and Vibration-Diagnostic Condition Monitoring of Turbo- Sets in Power Stations and Industrial Plants. D-64273 Darmstadt, 1995.
- [21] Cempel Cz.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. PWN, Warszawa 1989.
- [22] Cempel Cz. : Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn. WNT, Warszawa 1982.
- [23] Cempel Cz.: Zużycie maszyn a drgania-model tribowibroakustyczny maszyn. Materiały VIII Szkoły Diagnostyki "Wnioskowanie Diagnostyczne". Poznań-Rydzyna 1987, ss.93+110.
- [24] Cholewa W.: Frames in diagnostic reasoning. Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 1993 Vol. 3, No.3, pp. 595÷612.
- [25] Cholewa W.: Systemy doradcze w diagnostyce technicznej. Materiały XXIII Ogólnopolskiego Sympozjum "Diagnostyka Maszyn", Węgierska Górka 1996, ss.18÷27.
- [26] Cholewa W., Chodasewicz W., Kaźmierczak J., Moczulski W., Solipiwko A, Wysogląd B.: Analiza sygnałów diagnostycznych za pomocą mikrokomputera klasy IBM-PC. Materiały Konferencyjne "Komputerowo Wspomagane Konstruowanie i Badanie Maszyn Wirnikowych. CAD-Rotor" Kielce-Nowy Sącz, maj 1989, ss. 175-184.
- [27] Cholewa W., Chodasewicz W., Kaźmierczak J., Moczulski W., Solipiwko A., Wysogląd B.: Programowany analizator sygnalów diagnostycznych PAS6. Zeszyt nr 109 IMiPKM Politeczniki Śląskiej, Gliwice, grudzień 1988, 20 stron.
- [28] Cholewa W., Kaźmierczak J.: Diagnostyka techniczna maszyn. Przetwarzanie cech sygnalów. Skrypt uczelniany Politechniki Śląskiej nr 1904, Gliwice 1995.
- [29] Cholewa W., Kiciński J. Metody identyfikacji reguł dla diagnostycznych systemów doradczych. XXXV Sympozjon "Modelowanie w Mechanice". Gliwice 1995, ss. 57+66.
- [30] Cholewa W., Moczulski W.: Systemy doradcze w diagnostyce technicznej. Istota działania. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, zeszyt 2-3, 1990, ss. 331+342.
- [31] Cholewa W., Moczulski W.: Diagnostyka techniczna maszyn pomiary i analiza drgań. Skrypt uczelniany Politechniki Śląskiej nr 1758, Gliwice 1993.
- [32] Cholewa W., Pedrycz W.: Systemy doradcze. Skrypt uczelniany Politechniki Śląskiej nr 1447, Gliwice 1987.
- [33] Cholewa W., White M.F.: Inverse modelling in rotordynamics for identification of umbalance distribution. Machine Vibration. 1993 No.2, pp. 157÷167.
- [34] Cholewa W., Wysogląd B.: Aproksymacja trajektorii środka czopa w łożysku ślizgowym wielomianami ortogonalnymi. Materiały IX Szkoły Diagnostyki, Poznań-Rydzyna 1989, ss. 205÷212.
- [35] Diagnostyka Maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań. Pod redakcją Cempel Cz., Tomaszewski F. Wydane przez Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego, Radom 1992.
- [36] Drobniak S., Elsner W.:Komputerowy system nadzoru i diagnostyki turbozespołów. Materiały [69], ss. 93+112.

- [37] Dziemidowicz J., Froehlich M.: Doświadczenia zebrane przy obserwacji zjawisk przycierania w turbozespołach 200 MW. Przegląd Mechaniczny, No. 1-2 1995, ss. 30÷34.
- [38] Foiles W.C.: Mathematical Foundations for Orbit Analysis. Bently Nevada Corporation.
- [39] Gawroński T., Maliszewski W.: Drgania olejowe turbozespolu 55MW. Przegląd Mechaniczny, Nr. 1-2 1995, ss.35+38.
- [40] Gosiewski Z., Muszyńska A.: Dynamika maszyn wirnikowych. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynieryjnej w Koszalinie, Koszalin 1992.
- [41] Hagel R., Zakrzewski J .: Miernictwo dynamiczne. WNT, Warszawa 1984.
- [42] Hawit J.A., Bosman R.F.: Vibration Diagnostics by Expert Systems that Link to Machinery Databases. Int. Gas Turbin and Aeroengine Congress and Exposition, Orlando, FL June 1991.
- [43] ISO 7919: Mechanical vibration of non-reciprocating machines-Measurement on rotating shafts and evaluation. Beuth-Verlag GmbH, Berlin 30.
- [44] Jaromin Z., Janicki Sz.: Extending machinery life in a Polish power plant. Orbit. Volume 14, No.3, September 1993, pp.18÷19.
- [45] Jaskóła Z.: Analityczne podstawy oceny działania przekładni zębatych metodami akustycznymi. VII Konferencja Dynamiki Maszyn, Gliwice 1971.
- [46] Joh Y.D, Lee C.W, Excitation methods and modal parameter identification in complex modal testing of rotating machinery. The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis. July 1993, Vol.8 Number 3, pp. 179-204.
- [47] Jordan M.: What are orbit plots, anyway. Orbit, Volume 14, No.4, december 1993, s.8+15.
- [48] Kiciński J.: Symptomy diagnostyczne turbozespołów energetycznych określone metodą komputerowej i analogowej symulacji ich defektów. Materiały [69], ss. 51÷91.
- [49] Kiciński J.:Funkcje modeli symulacyjnych w diagnostyce technicznej. Materiały III Krajowej Konferencji, Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów. Szczyrk, październik 1995, ss. 113+124.
- [50] Kiciński J.: Teoria i badania hydrodynamicznych poprzecznych łożysk ślizgowych. Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Wrocław-Warszawa-Kraków 1994.
- [51] Kinder M., Brauer W.:Classification of trajectories extracting invariants with a neural network. Institut für Informatik, Technische Universität Münchem, Münchem 1994.
- [52] Klimek A.: Zastosowanie sieci neuronalnych w diagnostycznym systemie doradczym wspomagającym interpretację trajektorii. Materiały [91], ss. 183÷191.
- [53] Leja F.: Funkcje zespolone. PWN, Warszawa 1977.
- [54] Łączkowski R. Drgania elementów turbin cieplnych. WNT, Warszawa 1974.
- [55] Łączkowski R.: Wibroakustyka maszyn i urządzeń. WNT, Warszawa 1984.
- [56] Mitchel J.S. : An Introduction to Machinery Analysis and Monitoring. PennWell Publishing Company, Oklahoma 1981.
- [57] Moczulski W.: Techniki pomiaru promieniowych przemieszczeń względnych wałów. W [97] rozdział 2.

- [58] Moczulski W.: Metoda wibroakustycznych badań maszyn wirnikowych w warunkach rozruchu lub zatrzymywania. Praca doktorska, Gliwice 1984.
- [59] Moczulski W.: The digital synchronous filtering technique. Mech. System and Signal Processing. 1987 1(2), pp.197+210.
- [60] Moczulski W.: Typowe relacje diagnostyczne. W [97], rozdział 3.
- [61] Moczulski W., Wysogląd B., Maraszewski J., Wyczółkowski R.: Przykład oceny przyczyn nadmiernych drgań turbozespołu. Przegląd Mechaniczny, Nr. 1-2 1995, ss.38+41.
- [62] Mode Identyfication Probes. Orbit, Vol. 15, No. 2, June 1994, pp.28+29.
- [63] Morel J.:Drgania maszyn i diagnostyka ich stami technicznego.Wydawca:Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej. 1994.
- [64] Muszynska A.: Misalignment and shaft crack-related phase relationships for 1X and 2X vibration components of rotor responses. Orbit, Volume 10, No.2, september 1989, pp.4+8.
- [65] Nikiel T .: Elementy turbin parowych. PWT, Warszawa 1991.
- [66] Nowicki R.: Calendarium 1994. Przegląd Mechaniczny, N. 1-2, 1995, ss. 50+51.
- [67] Oppeheim A.V., Schafer R.W.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. WKiŁ, Warszawa 1979.
- [68] Opracowanie nowoczesnych systemów diagnostyki turbozespołów krajowych bloków energetycznych dużej mocy. Praca zbiorowa. Sprawozdanie z realizacji pracy badawczej nr. PBZ-038-06 KBN, maszynopis KPKM Pol. Śl., Gliwice 1995.
- [69] Orłowski Z.: Relacje diagnostyczne wybranych turbozespołów energetycznych. Ogólnopolskie Seminarium nt. Wibroakustyki Turbozespołów Energetycznych. Gdańsk 1994, ss. 115÷139.
- [70] Orłowski Z.: Metody diagnostyki technicznej podstawowych urządzeń elektrowni klasycznych. Materiały III Krajowej Konferencji, Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów. Szczyrk, październik 1995, ss. 201+212.
- [71] Otnes R., Enochson L.: Analiza numeryczna szeregów czasowych. WNT, Warszawa 1978.
- [72] Parszewski Z .: Drgania i dynamika maszyn. WNT, Warszawa 1982.
- [73] Persoon E., King-Su Fu,: Shape Discrimination Using Fourier Descriptors. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1977, Vol 7, No.3, pp.170÷179.
- [74] Projekt szkieletowego systemu doradczego przeznaczonego do dozorowania eksploatacyjnego i diagnostyki turbozespołów. Praca zbiorowa. Sprawozdanie z realizacji pracy badawczej nr. 905359101/p3 KBN, maszynopis KPKM Pol. Śl., Gliwice 1993.
- [75] Przybył J.: Turbogeneratory. Eksploatacja i diagnostyka. WNT, Warszawa 1991.
- [76] Randall R.B.: Frequency Analysis. Larsen & Son, Glostrup 1987.
- [77] Serridge M., Licht R.: Piezoelectric accelerometer and vibration preamplifier. Bruel and Kjear, 1987.
- [78] Shaft Centerline Position. Orbit Vol.14, No.3, September 1993, ss.28+29.
- [79] Solipiwko A .: Wyznaczanie średniej trajektorii środka czopa. w [97], ss. 5/20+5/26.
- [80] Southwick D.: Using full spectrum plot. Orbit Volume 14, No.4, December 1993, pp. 19+21.
- [81] Southwick D.: Plus and Minus Spectrum. Orbit Volume 14, No.2, Jule 1993, pp. 15÷20.
- [82] Spettel T.: Shaft position measurements reval the cause of turbine failure. Orbit, Jan. 1986, pp.6÷9.
- [83] Szabatin J. Podstawy teorii sygnałów. WKiŁ, Warszawa 1982.
- [84] Tondl A.: Erregunsmechanismen und Merkmale der Schwingungen von Turbomaschinen. III Symposium Carl Schenck AG. Willingen-Sauerland, Okt. 1995, ss. 61÷78.
- [85] TECHNICAD : Catalog 1993/94.
- [86] VDI Richlinien 2059/1981 : Wellenschwingungen von Turbosätzen

Blatt 1: Grundlagen für die Messung und Beurteilung,

Blatt 2: Wellenschwingungen von Dampfturbosätzen fur Kraftwerke,

Blatt 3: Wellenschwingungen von Industrietur bosätzen,

Blatt 4: Wellenschwingungen von Gasturbinensätzen.

- [87] Where should a Keyphasor transducer be mounted. Orbit, Vol. 15, No. 2, June 1994, pp. 26+27.
- [88] Wysogłąd B.: Kryteria oceny przemieszczeń względnych wałów. Materiały [97], Etap I, Gliwice 1989, rozdz. 4.
- [89] Wysogląd B.:Zapis cech opisujących trajektorię dla potrzeb diagnostycznego systemu doradczego. IX Konferencja Naukowo-Techniczna "Diagnostyka Maszyn Roboczych i Pojazdów", Bydgoszcz 1994, ss.373÷379.
- [90] Wysogląd B.: Elementy baz danych systemów doradczych wspomagających badania diagnostyczne. Seminarium Polskiego Towarzystwa Informatycznego, Zakopane, wrzesień 1992.
- [91] Wysogląd B.:Zastosowanie dyskretnej transformacji Fouriera do analizy sygnałów dwuwymiarowych opisujących trajektorie ruchu czopa w łożysku ślizgowym. III Intern. Conf. "Achievements in Mechanical and Material Enginieering", Politechnika Śląska, Gliwice 1994, ss.389+396.
- [92] Wysogląd B.:Zastosowanie metod analizy sygnałów wielowymiarowych do opisu trajektorii ruchu czopa w łożysku ślizgowym. Materiały III Krajowej Konferencji "Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów". Szczyrk, październik 1995, ss. 367÷374.
- [93] Wysogląd B.:Zastosowanie analizy korelacyjnej sygnałów dwuwymiarowych do opisu trajektorii ruchu czopa w łożysku ślizgowym. 4th Intern. Conf. "Achievements in Mechanical and Material Enginieering", Politechnika Śląska, Gliwice 1995, ss. 353÷356.
- [94] Wysogląd B .: Model źródła sygnału. Materiały [97], Etap II, Gliwice 1990, rozdz.2.
- [95] Wysogląd B., Solipiwko A., Kaźmierczak J.: Badania trajektorii środka czopa w łożysku ślizgowym za pomocą programowanego analizatora sygnałów PAS6. Materiały Konferencyjne "Komputerowe Wspomaganie Konstruowania i Badania Maszyn Wirnikowych. CAD-Rotor" Kielce-Nowy Sącz, maj 1989, ss. 195-204.

- [96] Zahn Ch., Roskies R.: Fourier Descriptors for Plane Closed Curves. IEEE Transactions on Computers, Vol. c-21, No. 3, March 1972, pp. 269+281.
- [97] Zastosowanie dwukierunkowego pomiaru przemieszczeń względnych wałów w diagnostyce turbozespołów. Praca zbiorowa. Sprawozdania z realizacji pracy NB-303, Etap I do III, maszynopis IMiPKM Pol. Śl., Gliwice 1989-1991.
- [98] Ziomek M., Migała J.: Runout przyczyny, pomiar i eliminacja. Przegląd Mechaniczny. No. 1, 1993, ss. 26+29.

METODY REPREZENTACJI DRGAŃ WAŁÓW MASZYN WIRNIKOWYCH W DIAGNOSTYCZNYCH BAZACH DANYCH

STRESZCZENIE

Celem pracy było opracowanie metod pozwalających na ilościową ocenę drgań wałów maszyn wirnikowych, której wyniki mogą być zapisane w relacyjnych bazach danych, stosowanych w diagnostycznych systemach doradczych wspomagających wnioskowanie o stanie technicznym maszyny wirnikowej.

Obserwacja drgań czopa wału względem panewki łożyska w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach, zawartych w jednej płaszczyźnie prostopadłej do osi wału, umożliwia otrzymanie dwóch sygnałów przemieszczeń wału, stanowiących pełny opis drgań czopa w płaszczyźnie promieniowej. Dokonany przegląd literatury wykazał, że brak jest ogólnie przyjętych metod analizy sygnałów zarejestrowanych jednocześnie w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach oraz umożliwił uporządkowanie obecnie uwzględnianych cech tych sygnałów i metod ich wyznaczania.

Zaproponowano rozpatrywanie drgań względnych środka czopa w łożysku ślizgowym w płaszczyźnie promieniowej, obserwowanych w dwu prostopadłych kierunkach, jako składowej rzeczywistej i urojonej sygnału zespolonego. Rozpatrywanie ruchu czopa jako sygnału zespolonego pozwoliło na wyznaczanie wartości cech drgań wałów, które nie mogą być otrzymane na podstawie rozłącznej analizy sygnałów składowych.

Dla potrzeb systemów doradczych wspomagających diagnozowanie dużych maszyn wirnikowych opracowano metody wyznaczania cech drgań czopa zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości, ocenianych dotychczas subiektywnie przez prowadzących badania, oraz zdefiniowano nowe cechy, istotne z punktu widzenia diagnostyki technicznej.

Reprezentacja drgań czopa w płaszczyźnie zespolonej pozwoliła na dokonanie formalnego zapisu wprowadzonych cech drgań czopa oraz pozwoliła na opracowanie metod wyznaczania uwzględnianych cech. Opracowano również algorytmy wykorzystujące techniki cyfrowe i procedury do wyznaczania tych cech. Weryfikację algorytmów i procedur przeprowadzono na przykładach sygnałów towarzyszących typowym niesprawnościom maszyn wirnikowych.

METHODS OF REPRESENTATION OF ROTOR SHAFT MOTION IN DIAGNOSTIC DATA BASES

SUMMARY

The purpose of this work is to find methods how to evaluate a shaft axis motion of rotating machines and how to storage results of this evaluation in relational data bases, used in expert systems aiding inference of technical states of rotating machines.

The observation of relative motions of the shaft center in the bearning pan, in two orthogonal directions laying in one layer perpendicular to shaft's axis, gives us two signals which can fully describe the motion of the shaft in radial direction. The review of literature showed that there are not any general methods of analysis of this type of signals measured at the same time. From the selected papers it results a rank of signals' attributes used in technical diagnosis and methods of their determination.

The author has proposed to consider the signals measured in this way as a real and imaginary component of a complex signal. This type of analysis makes it possible to determine a value of the characteristics of the rotor shaft, which cannot be estimated by analising vertical and horizontal components of the signal separately.

For expert systems supporting diagnosis of rotating machinery, algorithms of evaluation of characteristics of rotor shaft motion, which so far have been estimated subjectively, have been developed, both in frequency and time domain.

The new characteristics of the signals, significant for technical diagnosis, have also been defined.

Representation of shaft axis motion in complex domain, made it possible to describe new characteristics and work out the methods to find them. The algorithms evaluating these characteristics by means of numerical technics have been prepared as well.

Verification of the algorithms and procedures has been done using the examples of signals connected with selected states of the rotation machines.

МЕТОДЫ ПРЕДСТАВЛЕНИА КОЛЕБАНИЙ ВАЛОВ ТУРБОМАШИН В ДИАГНОСТИЧЕСКИХ БАЗАХ ДАННЫХ

РЕЗЮМЕ

Целью настоящей работы было разработать методы, позволяющие провести количественную оценку колебаний валов турбомашин, результаты каторой могут быть введены в базы данных, применяемый в диагностических консультативных системах, каторые помогают делать выводы о техническом состоянии турбомашин.

Наблюдение колебаний шипа вала относительно вкладыша подшипника в двух взаимно перпендикулярных направлениях, совмещенных на одной плоскости перпендикулярной оси вала, дает возможность получить два сигнала перемещения вала, которые являются полным описанием колебаний шипа в радиусной плоскости.

Осмотр литературы обнарушил отсутствие общепринятых методов анализа сигналов зарегистрированных одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях и дал возможность упорядочить учитываемые в данный момент характеристики этих сигалов и методы их определения.

Сделано предложение рассматривать относительные колебания центра шипа в подшипнике скольжения в раднусной плоскости, наблюдаемые в двух першендикулярных направлениях как активной так и мнимой составляющих комплексного сигнала. Рассматривание движения шипа как комплексного сигнала позволило определить значения характеристик колебаний валов, которых нельзя получить на основе отдельного анализа комплексных сигналов.

Для нужд консультативных систем, помогающих диагнозировать крупные турбомашины был разработан метод определения характеристик колебаний шипа, как в области времени так и в области частоты, оцениваемых до сих пор субъективно лицами ведущими исследования. Приведены также дефиниции новых характеристик существенных с точки зрения технической диагностики.

Представление колебаний шипа в комплексной плоскости позволило формально записать введенные характеристики колебаний шипа и разработать методы определения учитываемых признаков. Разработано также алгорнтмы, использующие цифровые техники И процедуры для определения этих характеристик. Верификация этих алгоритмов и процедур была проведена на примерах сигналов сопутствующих типовым неисправностям турбомашин.