Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

Paweł Chrzanowski

Metody jakościowej oceny cech sygnałów diagnostycznych

Gliwice 2001

Recenzenci

Prof. dr hab. inż. Jan Kiciński, Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku
Dr hab. Wojciech Moczulski Prof. nzw. w Politechnice Śląskiej

Redaktor Zeszytów

Wojciech Cholewa

Redaktor językowy

Ewa Opoka

Redaktor techniczny

Marek Wyleżoł

Projekt okładki

Wojciech Cholewa, Marek Wyleżoł

ISBN 83–906533–5–4

Wydawca

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice
tel. (32) 237-14-67, fax (32) 237-13-60
http://kpkm.mt.polsl.gliwice.pl

Druk i oprawa (z dostarczonych materiałów)
Drukarnia cyfrowa D&D sp. z o.o. ul. Moniuszki 6, 44-100 Gliwice

Od autora

Zeszyt został opracowany na podstawie mojej pracy doktorskiej wykonanej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Wojciecha Cholewy. Publiczna obrona rozprawy odbyła się 29 maja 2001 roku przed Komisją powołaną przez Radę Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląkiej. W opracowaniu zostały uwzględnione uwagi recenzentów pracy doktorskiej: prof. dr. hab. inż. Jana Kicińskiego i dr. hab. Wojciecha Moczulskiego, prof. nzw. w Politechnice Śląskiej.

Serdecznie dziękuję promotorowi prof. Wojciechowi Cholewie, recenzentom pracy doktorskiej i zeszytu, profesorowi Janowi Kicińskiemu i profesorowi Wojciechowi Moczulskiemu za wszystkie przekazane mi uwagi oraz Koleżankom i Kolegom z Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej za okazaną mi pomoc i życzliwość podczas wykonywania pracy.

Gliwice, lipiec 2001 *Paweł Chrzanowski*

Spis treści

1 Wprowadzenie **9**

1.1 Cel rozprawy . . . 12

1.2 Obszar badań . . . 12

1.2.1 Diagnostyka techniczna . . . 13

1.2.2 Czas . . . 13

1.2.3 Sygnał . . . 13

1.2.4 Stan . . . 14

1.2.5 Systemy doradcze . . . 14

1.2.6 Gromadzenie danych . . . 16

1.2.7 Cecha i wartość cechy . . . 21

1.2.8 Jakościowa ocena cech sygnałów diagnostycznych . . . 25

1.2.9 Podsumowanie . . . 33

1.3 Tezy . . . 34

1.4 Zakres rozprawy . . . 34

2 Ograniczanie wykresów wartości cech **37**

2.1 Ograniczanie liczby cech . . . 38

2.1.1 Redukcja poprzez przekształcanie . . . 40

2.1.2 Reprezentacja parametryczna . . . 42

2.2 Ograniczanie liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości . . . 47

2.2.1 Klasyfikacja . . . 47

2.2.2 Kwantowanie . . . 48

2.2.3 Kwantowanie z histerezą . . . 51

2.2.4 Reprezentacja przybliżonych wartości cech . . . 52

2.2.5 Zastosowanie liczb rozmytych . . . 58

2.3 Ograniczanie liczby elementów wykresów wartości cech . . . 61

2.3.1 Częstość pobierania danych . . . 61

2.3.2 Sklejanie . . . 62

2.4 Podsumowanie 64

3 Metody dopasowania dopuszczalnego ograniczenia 65
3.1 Analiza zmienności 65
3.2 Testy statystyczne 67
3.3 Analiza korelacyjna 70
3.4 Miary jakości 72
3.4.1 Ocena wykresów różnicowych 72
3.4.2 Ocena błędu klasyfikacji 74
3.4.3 Stopień ograniczenia wykresów wartości cech 75
3.5 Proponowany algorytm 76

4 Przykłady zastosowań proponowanych metod 77
4.1 Plan zastosowania proponowanych metod 77
4.2 Charakterystyka zadania 78
4.3 Ograniczanie liczby rozpatrywanych cech 82
4.4 Ograniczanie liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech 84
4.4.1 Przykład optymalizacji szerokości pasma kwantowania . . 86
4.4.2 Przykład dla składowych harmonicznych widm 96
4.4.3 Przykład dla składowych stałych 98
4.5 Wnioski 104

5 Podsumowanie i wnioski 107
5.1 Podsumowanie 107
5.2 Wnioski 110

Spis literatury 111

Streszczenie 119

Wykaz ważniejszych oznaczeń

$\widetilde{A}$	zbiór rozmyty
α_A	rozrzut lewostronny liczby rozmytej A
β_A	rozrzut prawostronny liczby rozmytej A
δ	szerokość pasma kwantowania
e_Q	szum kwantowania
$\mathcal{L}$	lewostronna funkcja odniesienia
μ_A	współczynnik przynależności do zbioru rozmytego A
m_A	wartość średnia liczby rozmytej A
MSO	miara stopnia ograniczenia (kompresji)
o	obiekt
$\mathcal{R}$	prawostronna funkcja odniesienia
QK	miara określająca błąd klasyfikacji
$r(x, y)$	współczynnik korelacji dwóch zmiennych
std	odchylenie standardowe
τ	czas mikro
t	czas makro
t_p	chwila, w której po raz pierwszy zaobserwowano rozpatrywaną wartość
t_k	chwila, w której po raz ostatni zaobserwowano rozpatrywaną wartość
U	zbiór badanych maszyn
V	przestrzeń wartości cech
V_U	rodzina zbiorów wartości cech w przestrzeni cech V
var	wariancja
x	dokładna wartość cechy
$\widehat{x}$	niedokładna wartość cechy

Rozdział 1

Wprowadzenie

Monitorowanie stanu maszyn jest dynamicznie rozwijającą się dziedziną nauki. Niezaprzeczalny wpływ ma na to m.in. rozwój techniki pomiarowej oraz techniki komputerowej (nowe możliwości sprzętowe, duża moc obliczeniowa, Internet, Intranet), umożliwiającej ciągłą obserwację i gromadzenie wielu cech sygnałów [98]. Dzięki tym nowym możliwościom wspomaganie procesu podejmowania decyzji co do dalszej eksploatacji obserwowanego obiektu badań może być prowadzone w czasie rzeczywistym i dotyczyć złożonych obiektów, jakimi są np. turbozespoły. Od wielu lat prowadzone są badania nad zastosowaniem systemów doradczych w celu monitorowania stanu maszyn [21], [27].

Program komputerowy, wykorzystujący wiedzę i procedury rozumowania dla wspomagania rozwiązywania problemów, wymagających wiedzy eksperta, nazywany jest *systemem doradczym* [34]. Jednym z podstawowych elementów systemów doradczych jest baza wiedzy. Pozyskanie wiedzy jest zadaniem skomplikowanym. Znaczące prace opisujące badania, mające na celu pozyskiwanie wiedzy dla takich baz, są wykonywane w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej pod kierunkiem W. Moczulskiego. Liczne publikacje dotyczące m.in. zastosowania indukcyjnych metod uczenia maszynowego i pozyskiwania wiedzy od specjalistów [71], [73], [72].

W celu pozyskiwania relacji diagnostycznych dla diagnostycznych baz wiedzy prowadzone są prace związane z metodami numerycznego odwracania wielowymiarowych, dynamicznych modeli maszyn [30],[62]. Numeryczne modele symulacyjne pozwalają na generowanie sygnałów odpowiadających złożonym stanom technicznym obiektu [57], [59]. Dla zweryfikowanych modeli wyznaczane są modele odwrotne, które określają poszukiwane relacje diagnostyczne przekształcające symptomy diagnostyczne w klasy stanów technicznych.

Wymogi dotyczące wnioskowania o stanie obiektu badań w czasie rzeczywistym spowodowały wzrost zainteresowania systemami ciągłego monitorowania. Narzuca to nowe sformułowanie m.in. reprezentacji wiedzy oraz reprezentacji danych. Dotychczasowe systemy doradcze działały w stałym otoczeniu, jednakże ciągłe monitorowanie wymusza zmienność otoczenia. Przykładem prac dotyczących dynamicznych systemów doradczych są publikacje, wśród których należy wymienić m.in.: [18], [20], [21], [22], [21], [15], [16], [25].

Monitorowanie stanu maszyn w czasie rzeczywistym powoduje, iż liczba dostarczanych danych jest wielokrotnie większa aniżeli wówczas, kiedy prowadzona była ocena stanu obiektu w stałym otoczeniu. W tym celu opracowywane są układy pomiarowe spełniające rygorystyczne wymagania i realizujące między innymi realizują następujące grupy działań [19]:

- wzmacnianie,
- przetwarzanie analogowo-cyfrowe,
- filtracja,
- wyznaczanie podstawowych punktowych wartości cech,
- usuwanie trendu (np. dla eliminacji trendów liniowych stosowana jest metodą najmniejszych kwadratów),
- skalowanie,
- analiza sygnału oparta na szybkiej transformacie Fouriera,
- wyznaczanie wartości jakościowej,
- równoczesna obserwacja wielu sygnałów,
- zapisywanie w bazie danych.

Podstawowym zadaniem realizowanym przez cyfrowe układy pomiarowe jest przetwarzanie analogowo-cyfrowe. Przetwarzanie to jest procesem dyskretyzacji, który składa się z dwóch oddzielnych operacji: próbkowania i kwantowania. Próbkowanie jest procesem, w których określane są chwile, w jakich sygnał ma być obserwowany. Natomiast kwantowanie polega na zmianie wartości analogowych w chwilach próbkowania na wartości liczbowe [5].

Wyznaczane przez układy pomiarowe wartości cech sygnałów diagnostycznych charakteryzują się tym, iż określane są w różnych jednostkach i nie są przystosowane do bezpośredniego porównywania. Skalowanie jest działaniem realizowanym przez te układy, mającym na celu usunięcie tych niedogodności poprzez sprowadzenie wartości cech do jednej skali. Omawiane układy pomiarowe mogą w dalszym etapie przetwarzania wyznaczać jakościowe oceny przeskalowanych wartości cech. Dzięki takim zabiegom możliwa jest znaczna redukcja definiowanych reguł diagnostycznych.

Bardziej złożonym działaniem realizowanym przez cyfrowe układy pomiarowe jest analiza sygnału z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera. Analiza ta pozwala na obserwację sygnałów w dziedzinie częstotliwości. Innym zastosowaniem tej transformaty jest realizacja filtracji sygnału. Filtrowanie sygnału jest operacją stosowaną w celu wygładzenia sygnału, wydzielenia składników widma oraz wyznaczania parametrów w różnych przedziałach częstotliwości [5]. Podstawowym zadaniem filtracji realizowanej przez układy pomiarowe jest eliminacja szumów.

Równoczesna obserwacja wielu sygnałów powoduje, iż proces wnioskowania dla licznych zbiorów danych staje się dość skomplikowany. Dlatego też aktualnie prowadzone są badania zmierzające do opracowania metod łącznej analizy sygnałów w wielokanałowych układach diagnozujących w zastosowaniu do maszyn wirnikowych. Głównym celem tych metod jest zastąpienie wielu cech cechą reprezentującą stan badanego obiektu [49].

W celu rejestrowania w bazach danych wartości cech sygnałów dostarczanych przez układy pomiarowe konieczne staje się przyjęcie odpowiedniej reprezentacji wartości cech, uwzględniającej czas obserwacji oraz zapewniającej ciągłość w czasie. Wynika to z potrzeby projektowania dynamicznych systemów doradczych. Ponadto należy dokonać wyboru struktury bazy przeznaczonej do przechowywania tych danych. Przykładem prac dotyczących baz danych w diagnostyce technicznej są [69], [70], [26], [24], [13], [31].

Względy optymalizacyjne wymuszają redukcję danych dostarczanych do układów pomiarowych, a także danych rejestrowanych przez te układy w bazie danych. Realizacją wstępnej redukcji danych jest dyskretyzacja sygnału. W celu dalszej redukcji stosowane są operacje kwantowania dla małej liczby klas. Liczba tych klas jest zależna od stopnia dokładności uzyskiwanych wartości. Najczęściej liczba tych klas sięga kilku, a reprezentanci tych klas są wartościami jakościowymi. Jednakże gromadzenie wartości jakościowych w celu obserwacji zmian rzeczywistych

wartości cech w dłuższym horyzoncie czasowym jest niewystarczające. Przykładem niech będzie analiza trendu wartości cechy, która z wiadomych przyczyn nie może być prowadzona na podstawie ocen jakościowych. Dokonując redukcji danych, należy mieć na uwadze to, iż nieprawidłowo przeprowadzona redukcja może spowodować wygenerowanie, przez układ wnioskujący systemu doradczego, innych wniosków. Konieczne jest zatem podjęcie próby opracowania takiej metody postępowania, która umożliwi wyraźne ograniczenie liczby gromadzonych danych, nie pociągając za sobą zmiany wniosków generowanych przez układ wnioskujący o stanie technicznym obiektu [37], [39], [40], [41], [38].

Badania prowadzono między innymi w ramach projektów KBN 7T07B 047 16 *Metody jakościowej oceny cech sygnałów diagnostycznych* oraz PBZ-038-06 *Opracowanie nowoczesnych systemów diagnostycznych turbozespołów krajowych bloków energetycznych dużej mocy.*

1.1 Cel rozprawy

Celem rozprawy było zaproponowanie takiej metody postępowania, która umożliwi wyraźne ograniczenie liczby danych gromadzonych w postaci wykresów wartości cech, sporządzanych dla potrzeb dynamicznych diagnostycznych systemów doradczych. Powodem obrania takiego kierunku badań są między innymi względy optymalizacyjne diagnostycznych baz danych, gdyż gromadzenie dużej liczby wartości cech w postaci dokładnej jest niemożliwe i nieuzasadnione, w szczególności w długim okresie (kilku miesięcy czy nawet kilku lat). Ponadto względy optymalizacyjne baz wiedzy powodują, iż wymaga się stosowania ocen jakościowych cech sygnałów wyznaczanych na podstawie danych bieżących oraz danych historycznych. Dlatego też redukcję danych należy przeprowadzać tak, aby nie powodować przy tym zmiany wniosków generowanych przez układ wnioskujący o stanie technicznym obiektu.

1.2 Obszar badań

W rozdziale tym zamieszczono aparat pojęciowy stosowany w dalszej części rozprawy, a także określono obszar prowadzonych badań.

1.2.1 Diagnostyka techniczna

Diagnostyka techniczna ([8], [10], [11], [14], [32], [28], [65], [72], [74]) zajmuje się rozpoznawaniem stanu technicznego, bądź klasy stanów obiektów technicznych w warunkach ograniczonej informacji. Stan techniczny obiektu jest określany w kategoriach *jakościowych*. Zastosowanie metod i środków diagnostyki technicznej umożliwia określenie stanu badanej maszyny w celu podjęcia decyzji o dalszym postępowaniu z maszyną. Decyzje te mogą dotyczyć jej dalszego użytkowania, podjęcia działań profilaktycznych lub wprowadzania dalszych zmian w konstrukcji, technologii, eksploatacji [98].

1.2.2 Czas

W diagnostyce maszyn, ze względu na sposób przetwarzania informacji, wyróżnia się czas *mikro* i czas *makro*. *Czas mikro* jest czasem, w którym wyznaczane są chwilowe wartości cech sygnałów (czas mierzony jest np. w ułamkach sekund). Natomiast czas, w którym obserwowane są zmiany stanu obiektu badań (minuty, godziny, dni, lata) nazywany jest *czasem makro* [11], [14], [32], [72]. Zakłada się, że rozpatrywane będą zbiory wartości cech obserwowane w obu tych dziedzinach czasu.

1.2.3 Sygnał

Sygnałem nazywa się przebieg dowolnej wielkości fizycznej mogącej być nośnikiem informacji. Sygnał opisywany jest za pomocą zbioru jego cech [32], [53]. Przyjmuje się, że sygnał f jest procesem stochastycznym [14]:

$$f : (\tau, t) \longrightarrow x \in R \tag{1.1}$$

gdzie:

τ - czas mikro,

t - czas makro,

R - zbiór liczb rzeczywistych.

Natomiast "(...) sygnały obserwowane we wspólnym dla nich czasie *mikro*, zapisywane są jako wielowymiarowy proces stochastyczny (...)."[14]:

$$f = f^n : (\tau, t) \longrightarrow x \in R^n \tag{1.2}$$

1.2.4 Stan

Według J. Dietrycha [44] "(...) *stan układu* to własność jakościowa i ilościowa będąca funkcją czasu lub funkcją współdziałania z innymi układami". Natomiast według teorii systemów [63], "(...) *system* składa się z elementów i występujących między nimi relacji, które wyodrębnia się jako przedmiot badania (...)".

W wyniku obserwacji obiektu otrzymywane są zbiory chwilowych wartości cech, które można traktować jako chwilowy obraz obserwowanych zjawisk, stanowiący obraz stanu obserwowanego obiektu [28].

1.2.5 Systemy doradcze

Systemem doradczym nazywany jest program komputerowy przeznaczony do wykonywania specjalistycznych zadań, które wymagają profesjonalnej wiedzy i doświadczenia w stosowaniu tej wiedzy [24]. Systemy te znajdują coraz szersze zastosowanie w zakresie wspomagania procesu:

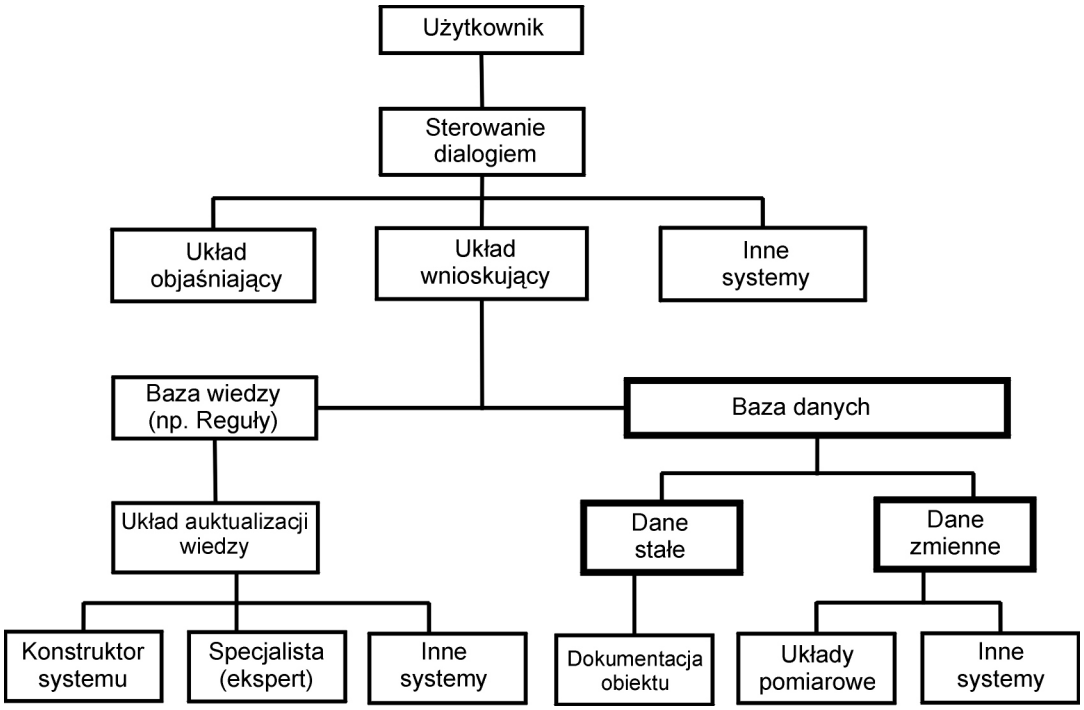
- obserwacji badanego obiektu,
- numerycznego wyznaczania cech obserwowanych sygnałów,
- gromadzenia danych,
- wnioskowania o stanie technicznym obserwowanego obiektu na podstawie wyznaczonych cech sygnałów diagnostycznych.

Głównymi elementami systemu doradczego (Rys. 1.1) są m.in.:

- baza wiedzy,
- baza danych,
- układ wnioskujący,
- układ objaśniający,
- układ sterujący dialogiem.

Baza wiedzy [73] jest wynikiem procesu pozyskiwania wiedzy dotyczącej pewnej wąskiej dziedziny zastosowań. Wyróżnia się dwa typy reprezentacji wiedzy:

- *wiedza proceduralna* - polega na określeniu procedur, których działanie reprezentuje wiedzę o dziedzinie [91],



Rysunek 1.1: Główne elementy systemu doradczego [24]

- *wiedza deklaratywna* - polega na określeniu zbioru faktów, stwierdzeń i reguł specyficznych dla rozpatrywanej dziedziny [66].

Ze względu na otoczenie, względem którego realizowane są zadania, rozpatrywane są dwie kategorie diagnostycznych systemów doradczych:

- systemy statyczne,
- systemy dynamiczne.

Statyczne systemy doradcze charakteryzują się tym, że:

- kontekst, w ramach którego prowadzony jest proces wnioskowania, jest stały i przesłanki nie są funkcjami czasu,
- zwiększenie zbioru uznanych przesłanek w procesie wnioskowania, nie prowadzi do zmian wcześniej wyznaczonych konkluzji [24].

Dynamiczne systemy doradcze działają w zmieniającym się otoczeniu (*online*) i przeznaczone są do realizacji zadań w ograniczonym czasie działania [24]. Systemy te znajdują zastosowanie w układach ciągłego monitorowania dużych maszyn. Głównym problemem stosowania dynamicznych systemów doradczych jest uwzględnianie dużej liczby sygnałów rozpatrywanych w dwóch skalach czasu

(w czasie mikro oraz w czasie makro). Wymagana jest przy tym odpowiednia reprezentacja wartości cech w funkcji czasu.

Niezależnie od podziału systemów doradczych na systemy statyczne i dynamiczne rozpatruje się systemy o nieograniczonym dopuszczalnym czasie działania oraz systemy o ograniczonym i gwarantowanym czasie działania. Systemy dynamiczne o gwarantowanym czasie wnioskowania mogą być przeznaczone do cyklicznego działania na podstawie wyników ciągłej obserwacji zmieniającego się w funkcji czasu obiektu. Ograniczony czas działania tych systemów jest niezbędny do zagwarantowania realizacji podstawowego cyklu [24].

1.2.6 Gromadzenie danych

Systemy ciągłego monitorowania obiektów wymagają stałego dostępu do bieżących danych. Złożoność obserwowanego obiektu powoduje, iż liczba tych danych jest dość znaczna. Głównym źródłem danych o działaniu systemów są m.in.:

- układy pomiarowe,
- złożone systemy sterowania i zabezpieczeń,
- przenośne układy pomiarowe,
- spostrzeżenia i wyniki obserwacji prowadzonych przez operatorów i bezpośrednich użytkowników,
- wyniki badań symulacyjnych [30].

Potrzebne jest gromadzenie dość licznych zbiorów danych, a także ich późniejsza pielęgnacja. Do tego celu stosowane są systemy baz danych.

Baza danych - jest to zbiór wzajemnie powiązanych danych, zawierający informacje dotyczące określonego zagadnienia, np. dane o badanych obiektach, dane dotyczące używanych czujników, dane o uzyskanych wynikach analiz. Model bazy danych zawiera zbiór danych (bazę danych) oraz zbiór programów obsługi danych i użytkowników bazy danych. Programy obsługi baz danych mają szerokie możliwości związane z zarządzaniem danymi, np. aktualizacja, sortowanie, przeszukiwanie, wybieranie, usuwanie. Ponadto programy te zapewniają:

- zmniejszenie redundancji gromadzonych danych - unikanie nadmiarowości danych w wyniku udostępnienia określonych danych wielu użytkownikom,

- zapewnienie jednakowego trybu wprowadzania danych dzięki ustaleniu określonej struktury i formatu danych,
- ograniczenie dostępu do danych objętych ochroną,
- zabezpieczenie danych przed przypadkowym zniszczeniem,
- zachowanie integralności danych - przyjmowanie tylko poprawnych danych,
- zapewnienie niezależności danych.

Modele danych

Organizacja danych w bazie jest określona za pomocą struktury tej bazy. Można wyróżnić trzy podstawowe typy struktur/modeli danych:

- strukturę hierarchiczną,
- strukturę sieciową,
- strukturę relacyjną.

Każda struktura ma swoje zalety i wady. Wybranie odpowiedniego modelu danych całkowicie zależy od rozwiązywanego problemu.

Model hierarchiczny W modelu hierarchicznym dane są przedstawione za pomocą prostej struktury w postaci drzew. Węzłami tych drzew są rekordy, pomiędzy którymi zachodzą relacje nadrzędności i podrzędności. Może istnieć dowolna liczba rekordów podrzędnych i dowolna liczba rekordów podrzędności. Każdy rekord posiada tylko jeden rekord nadrzędny, nie uwzględniający korzenia drzewa rekordów. W przypadku modelu hierarchicznego żaden rekord podrzędny nie może istnieć bez nadrzędnego. Znajdowanie określonego rekordu polega na przemieszczaniu się po drzewie rekordów - przejście do rekordu nadrzędnego, przejście do pierwszego rekordu podrzędnego, przejście do kolejnego rekordu podrzędnego. Wadą takiej struktury jest to, że wraz ze wzrostem liczby rekordów wzrasta stopień złożoności struktury, a tym samym wzrasta czas poszukiwania określonego rekordu.

Podejście hierarchiczne pozwala na naturalne modelowanie rzeczywistości, której odpowiadają struktury hierarchiczne.

Operacje zmieniające zawartość pamięci (wprowadzanie, usuwanie, aktualizacja danych) pociągają za sobą duże konsekwencje, np. usunięcie rekordu ze

struktury powoduje usunięcie wszystkich rekordów podrzędnych dla tego rekordu [43].

Model sieciowy W modelu tym, podobnie jak w modelu hierarchicznym, dane są reprezentowane przez rekordy i wiązania między nimi. Sieć jest strukturą bardziej ogólną niż struktura hierarchiczna, gdyż każde wystąpienie rekordu może mieć dowolną liczbę rekordów bezpośrednio nadrzędnych (nie tylko jeden, jak w przypadku hierarchii) i dowolną liczbę rekordów bezpośrednio podrzędnych. Relacje, jakie występują pomiędzy rekordami, są zapisywane w postaci rekordów zwanych łącznikami. Podejście sieciowe pozwala bardziej bezpośrednio niż podejście hierarchiczne modelować odpowiedniości wieloznaczne.

Podstawową wadą modelu sieciowego jest jego duża złożoność zarówno samego modelu danych, jak i związanego z nim języka obsługi. Model sieciowy jest bliższy strukturze pamięci niż modelowanym obiektom [43].

Model relacyjny Relacja jest pojęciem matematycznym, definiowanym klasycznie jako podzbiór iloczynu kartezjańskiego. Elementami relacji są krotki.

Strukturę relacyjną można rozpatrywać jako uproszczoną tablicę, której wiersze są rekordami zawierającymi pewną liczbę pól do przechowywania wartości cech, np. tekst, liczbę, wartość logiczną (Yes/No), datę, itp. Natomiast kolumny tej tablicy zawierają wartości jednej cechy dla różnych rekordów. Kolumny (cechy) każdego rekordu mają określone nazwy.

Kolejność atrybutów zależy wyłącznie od programisty, który taką bazę zbudował. Natomiast kolejność przedstawiania rekordów zależy od kryteriów porządkowania.

Posługiwanie się zorganizowanymi danymi polega na manipulowaniu tablicami (relacjami): wstawianiu i usuwaniu wierszy, wycinaniu kolumn, wybieraniu wierszy i łączeniu dwóch lub więcej tablic. Wynikiem tych działań są również tablice (relacje). Manipulowanie tablicami (relacjami) może odbywać się za pomocą działań algebry relacji lub innych, specjalnie zaprojektowanych języków [43]. Prosta budowa oraz obsługa to duże zalety struktury relacyjnej.

Bazy danych w diagnostyce technicznej

Systemy baz danych, wchodzące w skład systemów ciągłego monitorowania stanu maszyn, zawierają dwie grupy danych:

- *dane zmienne* - są to wyniki pomiarów i uwagi wprowadzane w trakcie eksploatacji obiektu,
- *dane stałe* - zawierają informację o strukturze obiektu i jego stanie. Mogą być aktualizowane okresowo na podstawie danych zmiennych [24].

Ponadto wyróżnia się kategorie danych [24]:

- dane o obiekcie,
- wartości cech sygnałów,
- dane konfiguracyjne określające np. graniczne wartości cech sygnałów.

W przypadku danych o obiekcie ważne jest gromadzenie danych umożliwiających jednoznaczną identyfikację rozpatrywanego obiektu. Ponadto zakres tych danych zależny jest od wymagań stawianych przez układ wnioskujący. Do danych opisujących obiekt zalicza się historię zdarzeń związanych z eksploatacją obiektu.

Najliczniejszą grupę danych stanowią wartości cech sygnałów diagnostycznych. Wartości te mogą występować w postaci:

- wartości punktowych wielowymiarowych (np. widmo dyskretne) i jednowymiarowych (np. ciśnienie, temperatura),
- wartości funkcyjnych (np. widmo przyspieszeń drgań).

Duża liczność zbioru danych, jak również częstość dostarczania danych (np. co kilka minut), powoduje, iż trzeba je redukować. Wynika to między innymi z potrzeby optymalizacji działania układów wnioskujących.

Unifikacja baz danych Rozwiązaniem umożliwiającym wymianę danych pomiędzy bazami danych dla obiektów tej samej klasy jest unifikacja baz danych. Przykładem tego jest prowadzony w Stanach Zjednoczonych projekt badawczy Machinery Information Management Open System Alliance w skrócie *MIMOSA* [69], [70]. Celem tego projektu jest opracowanie otwartego protokołu wymiany danych związanych z monitorowaniem stanu obiektów technicznych. Jego głównym elementem jest opracowana struktura relacyjnej bazy danych. Składa się ona z wielu tablic, podzielonych na grupy określające warunki pozyskiwania danych [13], [24]:

- definicje globalne,

- definicje w bazach danych,
- lokalizacje,
- listy baz danych,
- listy uporządkowane,
- segmenty,
- środek techniczny,
- modele obiektów,
- lokalizacje punktów pomiarowych,
- zdarzenia pomiarowe,
- wartości stałe,
- przetwarzanie sygnałów,
- okna czasowe i uśredniane,
- alarmy [69].

Ponadto określone są grupy tablic służące do gromadzenia danych uzyskanych w wyniku przeprowadzonych pomiarów.

Można zauważyć, że projekt MIMOSA znajduje coraz większe zainteresowanie ze strony producentów systemów ciągłego monitorowania. Widoczną oznaką tego faktu są dodatkowe opcje wymiany danych w formacie MIMOSA, w jakie wyposażane są systemy baz danych, będących częścią komercyjnych systemów ciągłego monitorowania (np. system zarządzania danymi $PRISM^4$ $Surveyor^{TM}$ [82] wchodzący w skład systemu monitorowania stanu $MARLIN^{TM}$ firmy SKF).

Baza danych systemu DT200 W ramach realizacji projektu badawczego pt. *Opracowanie nowoczesnych systemów diagnostycznych turbozespołów krajowych bloków energetycznych dużej mocy* opracowana została struktura relacyjnej bazy danych. Baza ta służy do gromadzenia danych stałych i danych zmiennych dostarczanych m.in. przez układy akwizycji i przetwarzania sygnałów diagnostycznych. Struktura ta składa się z grup tablic, w których gromadzone są [26]:

- definicje tablic decyzyjnych, na podstawie których system akwizycji i przetwarzania sygnałów realizuje określone w nich zadania,
- definicje cech sygnałów (zawierają opisy każdej cechy określonej w postaci słownika) ,
- definicje granicznych wartości cech sygnałów,
- definicje stanów pracy turbozespołu,
- wartości cech sygnałów diagnostycznych (punktowych jedno- i wielowymiarowych),
- parametry konfiguracyjne systemu (np. nazwa bazy, numer wersji).

1.2.7 Cecha i wartość cechy

Według J. Dietrycha [44], "(...)*cecha* to element zbioru, który stanowi orzeczenie o przedmiocie poznania lub o przedmiocie tworzenia (...)"i może być zapisywana w postaci:

$$x =< \ obj, nam(x), \ val(x) \ > \tag{1.3}$$

gdzie:

obj - rozpatrywany obiekt,

nam - nazwa cechy,

val - wartość cechy.

Nazwa cechy powinna jednoznacznie identyfikować znaczenie cechy np. *Wartość skuteczna prędkości drgań bezwzględnych w kierunku poziomym łożyska nr 6* [31]. Często przyjmuje się, że znany jest obiekt, dla którego rozpatrywane są cechy i pomija się w zapisie cechy informację o obiekcie.

Do opisania sygnału wyznacza się wartości jego cech [14]. Istnieje wiele publikacji, w których opisywane są rodzaje uwzględnianych cech sygnałów, a także metody ich wyznaczania, między innymi [5], [10], [87].

Możliwe są różne sposoby klasyfikowania cech sygnałów, przez co celowe jest wyróżnienie następujących klas cech:

- cechy o wartościach ilościowych i cechy o wartościach jakościowych,
- cechy punktowe i cechy funkcyjne,
- cechy jednowymiarowe i cechy wielowymiarowe (wielokanałowe)[39].

Cechy ilościowe i cechy jakościowe

Cechy ilościowe charakteryzują się tym, iż przestrzeń ich wartości jest zawarta w zbiorze liczb rzeczywistych lub całkowitych. W przestrzeniach wartości cech ilościowych ustalona jest relacja porządkująca, pozwalająca na porównywanie wartości w celu wskazania np. wartości większej.
Cecha jakościowa jest taką cechą, której wartość wskazuje jedynie klasę wartości. Wartość ta może być interpretowana jako kod identyfikujący klasę. Przykładem cechy jakościowej jest <*kolor*, *niebieski*>. Często wartościom jakościowym przyporządkowuje się liczby (identyfikatory). Możliwe jest również uporządkowanie wartości cech jakościowych, ale tylko w przypadku, kiedy cechy jakościowe są wielowartościowe (np. zimno < chłodno < ciepło < gorąco) i charakteryzują się naturalnym uporządkowaniem [28]. Ważne jest, aby kody (wartości ilościowe) przypisywane wartościom jakościowym zachowywały ich naturalny porządek.

Cechy punktowe i cechy funkcyjne

Cecha punktowa charakteryzuje się tym, że jej wartością jest element ciągłego lub dyskretnego zbioru wartości cech. Przykładem takiej cechy jest: < *temperatura, 49° C*>. Nazwa *cecha punktowa* wywodzi się stąd, że wartość tej cechy może być interpretowana jako punkt w przestrzeni wartości cech. Cechy punktowe obserwowane są często w funkcji czasu lub w funkcji innych cech opisujących warunki działania obiektu.

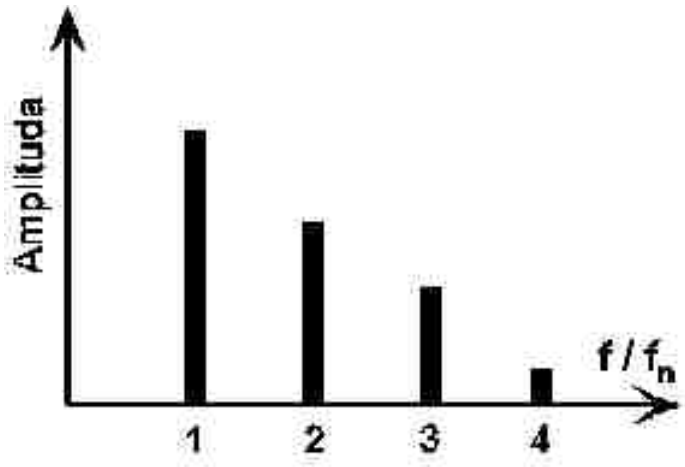
Częsta jest potrzeba równoczesnego uwzględniania wielu cech punktowych. Odpowiednio uporządkowany zbiór (lub krotka takich cech) może być interpretowany jako nowa cecha punktowa (wielowymiarowa), której wartość $val(x_i)$ jest pojedynczym elementem (punktem) w przestrzeni będącej iloczynem kartezjańskim przestrzeni wartości $spa(x_i)$ cech składowych x_i:

$$x =< x_1, x_2, x_3, ..., x_n > \tag{1.4}$$

$$val(x) \in \times_{i=1}^{n} spa(x_i) \tag{1.5}$$

Przykładem cechy punktowej wielowymiarowej jest dyskretne widmo mocy sygnału określone poprzez podanie jego składowych w wybranych pasmach częstotliwości.

Jeżeli przestrzenie wartości cech punktowych są przestrzeniami metrycznymi, wówczas możliwe jest wprowadzanie miar odległości w tych przestrzeniach.

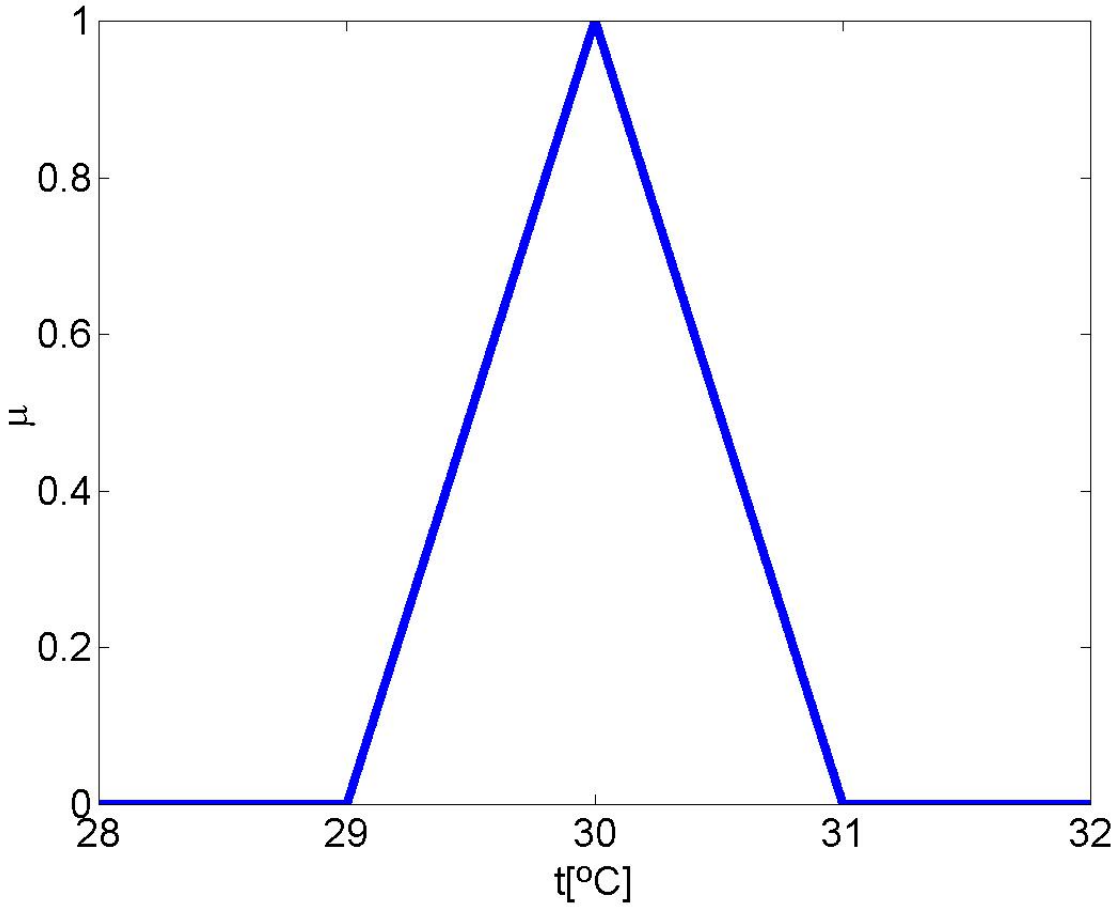


Rysunek 1.2: Dyskretne widmo amplitudowe jako przykład cechy punktowej wielowymiarowej

Wartościami *cech funkcyjnych* są funkcje, które mogą być określone analitycznie lub za pośrednictwem wykresu funkcji jako zbioru par $<$ *argument, wartość* $>$. Cechy funkcyjne różnią się od cech punktowych tym, że przestrzeń wartości cech funkcyjnych nie jest przestrzenią metryczną i stosowanie w tej przestrzeni miar podobieństwa lub odległości wymaga indywidualnego określenia definicji tych miar.

Dokładne i przybliżone wartości cech

Wartość przybliżoną, (w przeciwieństwie do wartości dokładnych) reprezentują wartości dokładne z nieznanym odchyleniem (zaokrągleniem). Dla przykładu, przybliżona wartość cechy *temperatura pokrywy* może być zapisana jako *około* 30^oC, przez co wartość rzeczywista może być rozumiana jako *29.9* bądź *30.01*.



Rysunek 1.3: Przykład definicji wartości przybliżonej *około 30°C*

Oznacza to, że nie jest znana wartość rzeczywista, natomiast wymagana jest znajomość kryteriów pozwalających określić znaczenie *około*. Jednym z narzędzi umożliwiających określenie wartości przybliżonej jest teoria zbiorów rozmytych, wprowadzona przez L.A. Zadeha [95] i od wielu lat rozwijana i stosowana w diagnostyce technicznej maszyn [14]. Na rysunku 1.3 przedstawiono przykład wartości przybliżonej *około 30* zdefiniowanej przy pomocy funkcji przynależności, gdzie μ oznacza stopień przynależności do zbioru rozmytego *około 30*.

Wartości przybliżone mogą być reprezentowane przez wartości punktowe dokładne o przyjętym zaokrągleniu, bądź przez wartości jakościowe, np. *wysoki*, *niski*.

Wykres wartości cechy

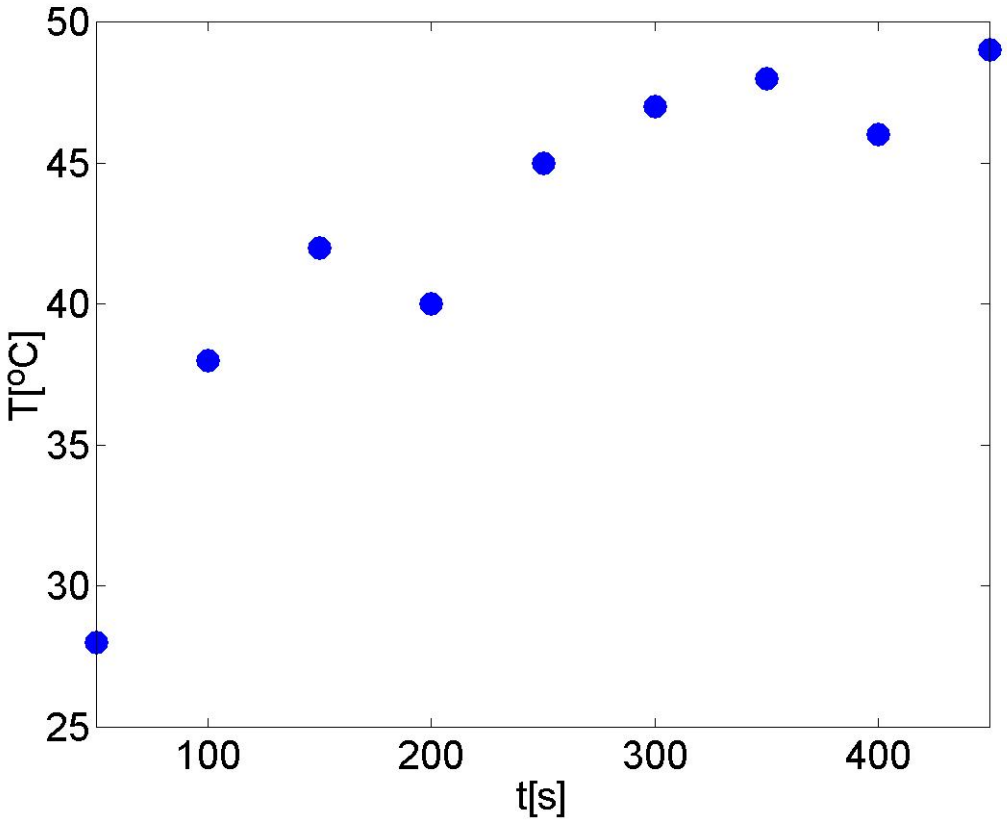
Jeżeli przyjmiemy, że wartości cech są rejestrowane w funkcji czasu (nie zawsze ze stałym krokiem czasowym), to otrzymane zbiory par <*wartość, czas*> nazy-

wać będziemy *wykresami wartości cech*. Wartości te mogą przyjmować postać: ilościową lub jakościową, punktową lub funkcyjną, jednowymiarową lub wielowymiarową, dokładną lub przybliżoną. Przykład wykresu wartości punktowych jednowymiarowych cechy "temperatura oleju"przedstawia Tab. 1.1

Tabela 1.1: Wykres wartości cechy T(t)

t[s]	50	100	150	...	450
T[°C]	28	38	42	...	49

Jedną z form reprezentacji wykresów wartości cech jest przedstawianie ich w postaci graficznej w układzie współrzędnych kartezjańskich (Rys. 1.4).



Rysunek 1.4: Graficzna reprezentacja wykresu wartości cechy T(t) [°C]

Obraz cechy

Dla rozpatrywanej wartości cechy można wyznaczać podobieństwo lub stopień przynależności jej wartości do uwzględnianych klas. Krotka zawierająca tak wyznaczone wartości stopnia przynależności może być rozpatrywana jako wartość nowej cechy, która nazywana jest *obrazem wartości cechy* [30].

1.2.8 Jakościowa ocena cech sygnałów diagnostycznych

Wartości cech opisują zjawiska zachodzące w obserwowanym obiekcie. Najczęściej obserwowane wartości cech mają charakter dyskretny. Proces wnioskowania o stanie obiektu badań opiera się w głównej mierze na wartościach jakościowych. Wartości te uzyskiwane są w procesie przetwarzania poprzez klasyfikację, bądź dostarczane są bezpośrednio od operatora systemu. Ponadto zastosowanie wartości jakościowych znacznie ułatwia dialog systemu wnioskowania z użytkownikiem.

Zbudowanie baz wiedzy, w szczególności dla złożonych obiektów, bez unifikacji reguł diagnostycznych jest niemożliwe. Budowanie reguł uogólnionych podyktowane jest nie tylko względami ekonomicznymi związanymi z ograniczeniem liczby budowanych reguł, ale też względami użytkowania rozumianymi jako umożliwienie komunikacji pomiędzy systemem a użytkownikiem. Komunikacja ta najczęściej odbywa się za pośrednictwem dialogu w języku zbliżonym do naturalnego, charakteryzującego się przybliżeniem wynikającym ze sposobu rozumowania przez człowieka. Dlatego też wymagana jest odpowiednia reprezentacja wiedzy, umożliwiająca w dalszym etapie wnioskowania przetwarzanie informacji zapisywanej w sposób jakościowy. Powszechnie stosowaną metodą uzyskiwania wartości niedokładnych w postaci jakościowej, bądź ilościowej jest dyskretyzacja. Proces ten polega na przekształceniu ciągłego zbioru funkcji lub jej argumentu w zbiór dyskretny. W wyniku dyskretyzacji otrzymuje się zbiory wartości reprezentujące określone klasy wartości jakościowych, bądź ilościowych. Liczba tych klas zależna jest od stosowania otrzymywanych wartości. Proces dyskretyzacji może być też przeprowadzony z zastosowaniem odpowiednich metod grupowania.

Podstawowym założeniem, które zostało przyjęte na początku realizacji pracy, było stwierdzenie, że ze względu na potrzeby dynamicznych systemów doradczych stosowanie cech jakościowych jest korzystniejsze od stosowania cech ilościowych, gdyż wynik określany jest w sposób przybliżony, cechy jakościowe umożliwiają budowanie reguł uogólnionych oraz są zrozumiałe dla człowieka.

Zmienna rozmyta i zmienna lingwistyczna

Jedną z form reprezentacji wiedzy w postaci wartości jakościowej jest *zmienna rozmyta*. Pojęcie zmiennej rozmytej zostało wprowadzone przez L.A Zadeha w teorii zbiorów rozmytych.

Zmienną rozmytą określa się jako trójkę uporządkowaną:

$$(X,\ U,\ R(X;u)) \tag{1.6}$$

gdzie:

X - nazwa zmiennej,

U - obszar rozważań $U = \{u\}$,

$R(X;u)$ - rozmyty podzbiór zbioru U, reprezentujący rozmyte ograniczenie nałożone przez X na wartości u.

Zmienną nierozmytą u, na którą nie jest nałożone żadne ograniczenie, nazywa się zmienną bazową zmiennej rozmytej X.

Równanie przypisujące dla zmiennej rozmytej X ma postać [56]:

$$x = u\ :\ R(X) \tag{1.7}$$

Stopień, w którym jest spełnione równanie przypisujące (1.7) nazywa się *kompatybilnością* u z $R(X)$ i definiuje jako:

$$c(u) = \mu_{R(X)}(u),\ u \in U \tag{1.8}$$

Dla przykładu, rozpatrzmy zmienną rozmytą o nazwie *gorąco* w sensie np. temperatury wody w stopniach Celsjusza. Niech $U = [0, 100]$, a ograniczenie zapisane jest w postaci:

$$\mu_{R(X)}(u) = \begin{cases} 1 & dla \quad u \geqslant 50 \\ \frac{1}{1+((50-u)/10)^2} & dla \quad u < 50 \end{cases} \tag{1.9}$$

Wówczas w równaniu przypisującym:

$$\text{gorąco} = 45 : R(\text{gorąco}) \tag{1.10}$$

kompatybilność 45 z ograniczeniem nałożonym przez nazwę *gorąco* wynosi:

$$c(45) = \mu_{R_{gorąco}}(45) \simeq 0,8 \tag{1.11}$$

Podobnie jak zmienne rozmyte jednowymiarowe można rozpatrywać zmienne rozmyte wielowymiarowe. Jeżeli X_1, X_2, ..., X_n są zmiennymi rozmytymi zdefiniowanymi w odpowiednich obszarach rozważań U_1, U_2, ... U_n, wówczas n-tka uporządkowana:

$$X = (X_1, X_2, ..., X_n) \tag{1.12}$$

jest zmienną rozmytą złożoną n-wymiarową, określoną w obszarze rozważań $U = U_1 \times U_2 \times ... \times U_n$. Ograniczenie $R(X) = R(X_1, X_2, ..., X_n)$ jest relacją rozmytą n-argumentową w $U_1 \times U_2 \times ...U_n$. Równanie przypisujące ma postać:

$$(x_1, x_2, ..., x_n) = (u_1, u_2, ..., u_n) \qquad : \qquad R(X_1, X_2, ..., X_n) \tag{1.13}$$

Z kolei kompatybilność określana jest jako:

$$c(u_1, u_2, ..., u_n) = \mu_{R_{(x_1, x_2, ..., x_n)}}(u_1, u_2, ..., u_n) \tag{1.14}$$

Jeżeli ograniczenie jest relacją n-argumentową określoną na U o funkcji charakterystycznej, której wartości przyjmowane są ze zbioru $\{0, 1\}$, wówczas zmienna taka jest zmienną nierozmytą.

Zmienna lingwistyczna to taka, której wartościami nie są liczby, a zdania w określonym języku, utożsamiane w sensie semantycznym z określonymi zbiorami rozmytymi [56]. Zmienną lingwistyczną określa się jako piątkę uporządkowaną:

$$(H,\ T(H),\ U,\ G,\ M) \tag{1.15}$$

gdzie:

H - nazwa zmiennej,

$T(H)$ - zbiór terminów tej zmiennej (nazw wartości tej zmiennej)

U - przestrzenie, na których określone są zbiory rozmyte opisujące te terminy,

G - reguła syntaktyczna, opisująca strukturę generowanych terminów omawianej zmiennej,

M - reguła semantyczna, łącząca z każdą wartością X danej zmiennej lingwistycznej jej znaczenie.

Ważnym zadaniem jest ustalenie zbioru terminów T zmiennej lingwistycznej. Zbór ten jest zapisywany w postaci listy, której liczba elementów zależy od przyjętej liczby klas wartości cechy. Przy budowie baz wiedzy systemów doradczych

zmierza się do znacznego ograniczenia liczby tych terminów. Wymagane jest określenie indywidualnie dla każdej cechy, bądź grupy cech, zbioru T i generowanie ich wartości.

Wartości tej listy mogą mieć charakter uporządkowany, np. {*małe, średnie, wysokie*}, bądź nie dający się uporządkować w jakikolwiek sposób, np. kształt trajektorii ruchu środka czopa {*banan, elipsa, ósemka*}

Klasyfikacja

Klasyfikacja (w rozpatrywanym przypadku) jest rozumiana jako przyporządkowanie wartości cechy do jednej z wzorcowych klas wartości, na podstawie określonych kryteriów. Kryteria te nazywane są klasyfikatorami. Wartość cechy reprezentowana przez macierz jednokolumnową interpretowana jest jako punkt w wielowymiarowej przestrzeni cech. Ze względu na rodzaj zdefiniowanych reguł klasyfikacji można wyróżnić następujące metody klasyfikacji:

- dokładnej do dokładnych klas,
- dokładnej do przybliżonych klas,
- przybliżonej do dokładnych klas,
- przybliżonej do przybliżonych klas.

Wynikiem klasyfikacji dokładnej jest numer klasy, do jakiej został zaklasyfikowany element. Przykładem klasyfikacji niedokładnej jest klasyfikacja oparta na teorii zbiorów rozmytych (L.A. Zadeh [95]). Dzięki stosowaniu tej metody otrzymuje się wynik klasyfikacji w postaci wartości stopnia przynależności do rozpatrywanej klasy stanu obserwowanego obiektu badań. Zastosowanie tych metod w diagnostyce maszyn opisano w [14].

Do budowy klasyfikatora, zarówno dokładnego, jak i przybliżonego, niezbędnego przy podejmowaniu decyzji o stanie obiektu badań wymagane jest stosowanie odpowiednich zbiorów uczących [64]. Do pozyskania takich zbiorów danych stosowane są metody oparte na diagnostycznych modelach odwrotnych [29], [62], czy też metodach uczenia maszynowego [72].

Zastosowanie metod klasyfikacji do jakościowej oceny cech sygnałów diagnostycznych ma duże znaczenie wówczas, gdy wynik tej oceny jest możliwy wyłącznie na podstawie ocenianej cechy ze zbiorem wzorców klas. Wzorce te mogą np. reprezentować typowe niesprawności, którym odpowiadają określone postaci

wartości cech. Podstawowym przykładem wymagającym zastosowania metod klasyfikacji jest ocena kształtu trajektorii ruchu środka czopa. Należy wyznaczyć zbiór wzorców tych trajektorii, takich jak: *banan*, *elipsa*,*ósemka*. Proces oceny jakościowej opartej na klasyfikacji składa się z dwóch etapów:

1. wyznaczenie wartości ilościowych określających podobieństwo do trajektorii wzorcowych,
2. wyznaczenie reprezentanta, w stosunku do którego miara podobieństwa jest maksymalna.

Kierunek zmian

Cechą charakterystyczną dynamicznych systemów doradczych jest to, że działają w zmieniającym się otoczeniu. Jednym ze sposobów obserwacji wartości ilościowych jest obserwacja ich kierunku (zachowania wartości w czasie). Można wyróżnić: względny kierunek zmian wartości oraz długoczasowy kierunek zmian wartości. Pierwszy przypadek dotyczy oceny występujących po sobie wartości. Ocena jakościowa kierunku zmian może być realizowana na podstawie obserwacji znaku uzyskiwanego w wyniku obserwacji znaku różnicy wartości w chwili t względem wartości w chwili poprzedniej $t-1$ (1.16):

$$znak = \begin{cases} + & \text{jeżeli } x(t) > x(t-1) \\ 0 & \text{jeżeli } x(t) = (t-1) \\ - & \text{jeżeli } x(t) < x(t-1) \end{cases} \tag{1.16}$$

Do oceny długoczasowego kierunku zmian wartości cech stosowane są metody analizy trendu, np.:

- wygładzanie wykładnicze,
- regresja liniowa,
- metoda średnich ruchomych.

Dla wyznaczonego kierunku zmian, ocena jakościowa polega na przyporządkowaniu odpowiedniej wartości jakościowej ze zbioru:

$$x = \{\text{wzrost, bez zmian, spadek}\} \tag{1.17}$$

Przykład oceny kierunku zmian wybranej wartości cechy punktowej jednowymiarowej przedstawiono w (Tab.1.2).

Tabela 1.2: Przykład oceny kierunku zmian wybranej wartości cechy punktowej jednowymiarowej

t	x(t)	kierunek zmian	wartość jakościowa
0	20	0	
1	25	1	wzrost
2	25	0	bez zmian
3	30	1	wzrost
4	25	-1	spadek
5	25	0	bez zmian

Liczba klas wartości jakościowych określających kierunek zmian może być znacznie większa; przykładowo zbiór wartości (1.17) można rozszerzyć o elementy dodatkowe *duży* oraz *mały*, przez co otrzymuje się następujący zbiór (listę) zmiennych określających kierunek zmian:

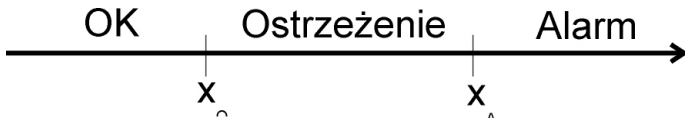
$$X = \left\{ \begin{array}{l} \text{duży wzrost, wzrost, mały wzrost,} \\ \text{bez zmian,} \\ \text{mały spadek, spadek, duży spadek} \end{array} \right\} \tag{1.18}$$

W tym przypadku wymagane jest indywidualne, dla rozpatrywanej cechy, ustalenie klas wartości. Klasy te mogą być określone w sposób dokładny lub niedokładny za pomocą opisanych wcześniej zmiennych rozmytych.

Wartości graniczne

Ocenę jakościową cech sygnałów diagnostycznych można przeprowadzić na podstawie porównania uzyskanej (w wyniku pomiaru) wartości cechy z przyjętymi wartościami odniesienia. Wartości odniesienia, o których mowa, noszą nazwę wartości granicznych. Najczęściej wartości te odzwierciedlają istotne zachowania rozważanej cechy i ustalane są w zależności od możliwych stanów lub klas wartości, jakie mogą reprezentować. Najprostszym przypadkiem jest jedna wartość graniczna dzieląca rozpatrywany zbiór liczb rzeczywistych na dwa zbiory rozłączne. Przykładem takiej wartości granicznej jest liczba 0, dzieląca zbiór liczb rzeczywistych na zbiór (klasę) liczb dodatnich i zbiór (klasę) liczb ujemnych. Rozpatrując wartości cech sygnałów diagnostycznych zauważa się, że najczęściej wartości graniczne dzielą zbiór wartości cechy na 3 zbiory {*wartość normalna (OK), wartość dopuszczalna (Ostrzeżenie), wartość niedopuszczalna (Alarm)* }, gdzie wartościami granicznymi są x_O - *Ostrzeżenie* oraz x_A - *Alarm*. Przykład omawianego

wzorca został pokazany na rysunku 1.5, natomiast warunki określające dokładne klasy wartości są opisane równaniem (1.19).

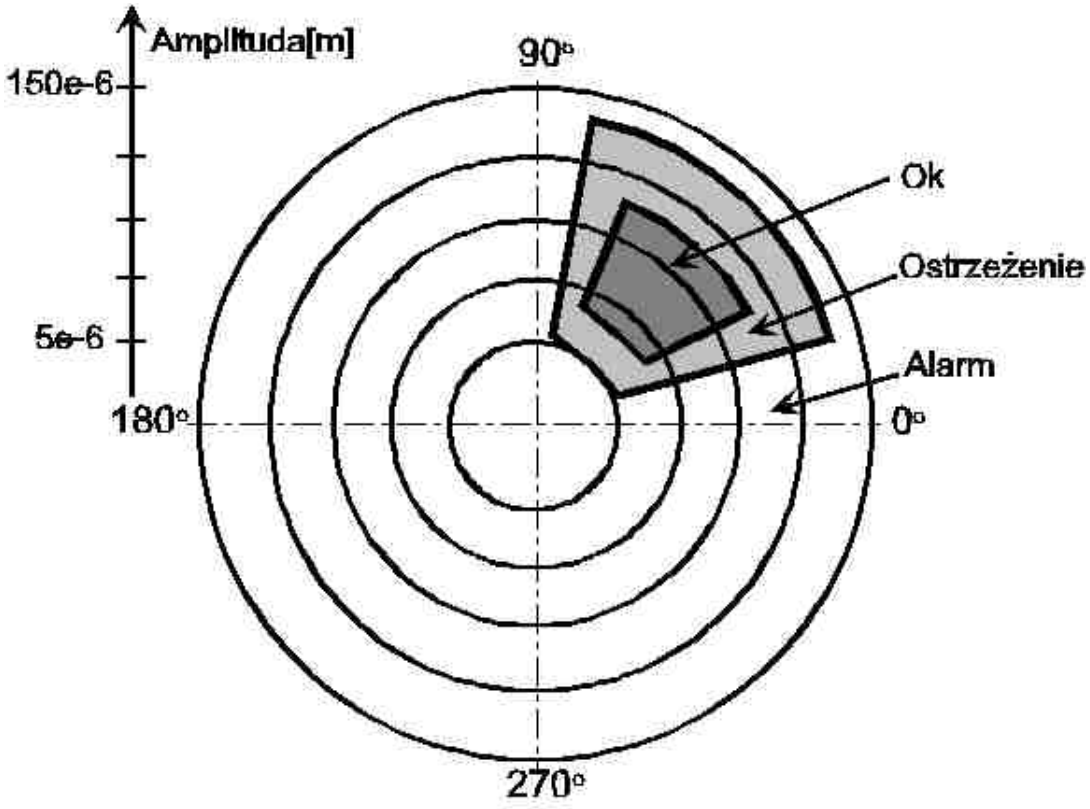


Rysunek 1.5: Wzorzec przedziałów, określony przez wartości graniczne: x_O - Ostrzeżenie, x_A - Alarm

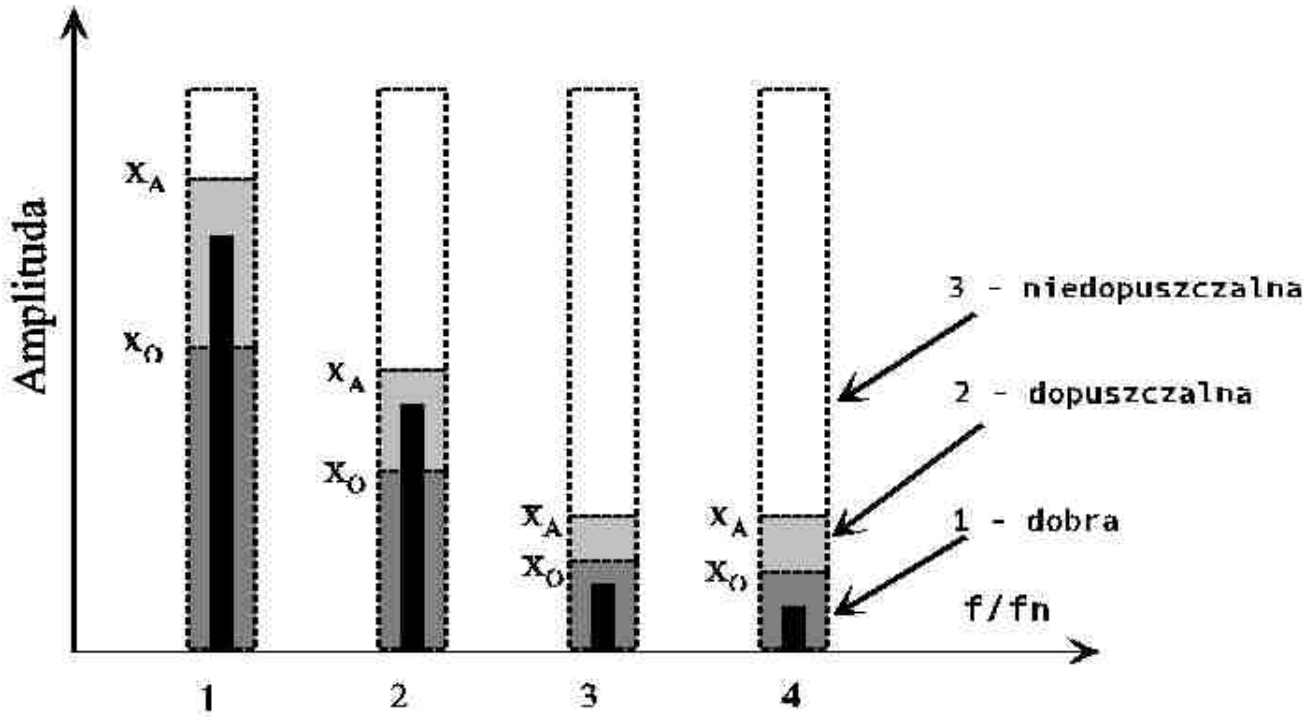
$$\widehat{x} = \begin{cases} \text{OK} & x < x_O \\ \text{Ostrzeżenie} & x_O \leqslant x < x_A \\ \text{Alarm} & x \geqslant x_A \end{cases} \tag{1.19}$$

Cechą charakterystyczną takiej oceny jakościowej jest zachowanie porządku liniowego (od wartości najmniejszej do największej lub odwrotnie).

Jeżeli jednocześnie rozpatrywane są dwie cechy, wówczas wartości graniczne określają obszary. Przykładem mogą być obszary dopuszczalnych położeń linii osi wałów w łożyskach hydrodynamicznych turbiny (Rys.1.6). Rozpatrywanie wielu cech jednocześnie (więcej niż dwóch) prowadzi do sytuacji, w której wartości graniczne każdej cechy wyznaczają wielowymiarowe przestrzenie akceptacji. Wzrost liczby rozpatrywanych jednocześnie cech powoduje, iż wymagane jest stosowanie metod łącznej oceny. W ostatnich latach w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej prowadzone są badania zmierzające do opracowania metod łącznej analizy sygnałów w wielokanałowych układach diagnozujących dla maszyn wirnikowych. Głównym celem tych metod jest zastąpienie wielu cech cechą reprezentującą stan badanego obiektu [49]. W związku z tym, iż prace związane z metodami łącznej oceny cech sygnałów diagnostycznych prowadzone są równolegle przez innych autorów, w rozprawie przyjmuje się, że opracowanie tych metod nie jest obszarem badań autora. Zakłada się, że ocena wartości w wielowymiarowej przestrzeni cech polegać będzie na indywidualnej ocenie wartości dla poszczególnych cech tej przestrzeni. Dla przykładu, parametryczna postać widma amplitudowego jest rozpatrywana jako punkt w wielowymiarowej przestrzeni cech. Dla każdej składowej ustala się wartości graniczne w sposób indywidualny (Rys. 1.7). Klasy jakościowe mogą być reprezentowane przez identyfikatory, wartości jakościowe, kolory. Ocenę jakościową takiego widma można



Rysunek 1.6: Obszary położeń linii osi wałów w łożyskach hydrodynamicznych turbiny



Rysunek 1.7: Przykład ograniczenia cechy funkcyjnej w zbiorze wartości

przeprowadzić za pomocą klasyfikatora zdefiniowanego następująco (1.19):

$$\widehat{x}_f = \begin{cases} 1 - \text{wartość } \textit{dobra} & \text{dla} \quad x_f < x_O \\ 2 - \text{wartość } \textit{dopuszczalna} & \text{dla} \quad x_O \leqslant x_f < x_A \\ 3 - \text{wartość } \textit{niedopuszczalna} & \text{dla} \quad x_f \geqslant x_A \end{cases} \tag{1.20}$$

gdzie:

f - numer składowej harmonicznej widma,

x_O - graniczna wartość klasy *dopuszczalna* (ostrzeżenie),

x_A - graniczna wartość klasy *niedopuszczalna* (alarm).

W wyniku przeprowadzonej oceny jakościowej kolejnych składowych (wg zależności (1.20)) przykładowego widma (Rys. 1.7), otrzymywany jest wektor składający się z identyfikatorów reprezentujących klasy wartości jakościowych:

[2 2 1 1]

Łączną ocenę jakościową widma można przeprowadzić wg następującej zależności [36]:

$$\widehat{x} = \max_{f=1}^{n} \widehat{x}_f \tag{1.21}$$

W wyniku stosowania równania (1.21), ocena jakościowa przykładowego widma (Rys. 1.7) wynosi $\widehat{x} = 2$. Oznacza to, że widmo reprezentuje klasę wartości: *"wartość dopuszczalna"*.

1.2.9 Podsumowanie

Nowoczesne układy pomiarowe realizujące szereg działań związanych z jakościową oceną cech sygnałów diagnostycznych dostarczają licznych zbiorów wartości cech. W wyniku stosowania tych układów pomiarowych w systemach monitorowania stanu złożonych obiektów wymagane jest gromadzenie otrzymywanych zbiorów wartości, na podstawie których prowadzi się proces wnioskowania. Konieczne jest przy tym wyznaczanie jakościowych ocen wartości cech sygnałów. Ocena jakościowa wartości cech sygnałów diagnostycznych najczęściej opiera się na porównaniu zmierzonej wartości z wartościami granicznymi. Wartości graniczne są określane w normach lub zaleceniach producenta. Wartości te można również pozyskiwać na podstawie prowadzonych badań. Dla potrzeb parametryzacji reguł diagnostycznych konieczne jest uwzględnianie wartości jakościowych. Jednym ze sposobów uzyskania wartości jakościowych jest kwantowanie przy małej liczbie przedziałów. Kwantowanie to może być równomierne bądź nierównomierne. Może również dotyczyć kwantowania prowadzonego na podstawie metod grupowania, a dalej klasyfikacji. Jednakże w prognozowaniu kwantowanie dla małej liczby przedziałów, jak też przechowywanie wartości jakościowych, jest niewystarczające. Spowodowane jest to między innymi dużymi szumami, jakie są uzyskiwane w wyniku takiej dyskretyzacji.

Przedstawione metody definiowania klasyfikatorów, będących podstawą wyznaczania wartości jakościowych są ogólnie znane i nie wymagają rozwijania.

Ponieważ gromadzenie wartości jakościowych jest niewystarczające, wymagane jest równoczesne gromadzenie danych ilościowych (wartości cech sygnałów). Względy optymalizacyjne baz danych wymuszają stosowanie metod redukcji tych danych. Dokonując redukcji wartości cech sygnałów diagnostycznych, należy mieć na uwadze dopuszczalny stopień redukcji, który nie pociąga za sobą zmiany wniosków o stanie obiektu, generowanych przez układ wnioskujący systemu doradczego. W rozprawie główna uwaga została skupiona na redukcji wartości cech sygnałów diagnostycznych dostarczanych przez układy akwizycji i przetwarzania sygnałów.

1.3 Tezy

Zaproponowana metoda ograniczania liczby danych gromadzonych w postaci wykresów wartości cech:

1. nie wprowadza istotnych zniekształceń wartości jakościowych cech sygnałów diagnostycznych,

2. umożliwia znaczną redukcję wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych.

1.4 Zakres rozprawy

Treść rozprawy została zawarta w pięciu rozdziałach. W rozdziale pierwszym dokonano przeglądu literatury związanej z przedmiotem badań, sformułowano cel rozprawy, a następnie szczegółowo został omówiony obszar badań. Podano definicje podstawowych pojęć używanych w dalszych badaniach takich jak diagnostyka techniczna, czas, sygnał, stan, systemy doradcze, gromadzenie danych, cechy i wartość cechy, wykres wartości cechy oraz jakościowa ocena cech sygnałów diagnostycznych.

Rozdział drugi zawiera opis metod ograniczania wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych. Dokonano podziału na trzy grupy metod ograniczania wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych: ograniczanie liczby cech, ograniczanie liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech oraz ograniczanie liczby elementów wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych. Jako jedno z rozwiązań ograniczania w zbiorze uwzględnianych cech opisano metodę reprezentacji parametrycznej. Ograniczanie liczby cech nie jest obszarem zainteresowań autora rozprawy, gdyż zagadnienia te są przedmiotem odrębnych badań. Główny nacisk położono na metody ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości, do których można zaliczyć metody: grupowania i klasyfikacji, kwantowania, reprezentacji przybliżonych wartości cech oraz reprezentacji rozmytej. Ogólnie, zaprezentowane metody ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości powodują utratę dokładnej informacji poprzez np. zaokrąglenie w granicach dopuszczalnych wartości rzeczywistych. Z uwagi na wymogi stawiane dynamicznym systemom doradczym, złożoność metod klasyfikacji powoduje, iż stosowanie ich do dynamicznego ograniczania wykresów wartości cech nie jest wskazane. W głównej mierze autor skoncentrował się na metodzie kwanto-

wania. Ponadto autor rozprawy zaproponował metodę *kwantowania z histerezą*, której zadaniem jest ograniczenie szumów kwantowania występujących na granicach pasm kwantowania wtedy, gdy kwantowane są wartości cech sygnałów. Oprócz ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów można przeprowadzać ograniczenie liczby elementów wykresu wartości cech sygnałów. Przykładem takiej metody jest sklejanie elementów wykresu wartości cechy.

W rozdziale trzecim opisano metodę optymalizacji dopuszczalnego stopnia ograniczenia liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości dla kwantowania z histerezą. Metoda ta opiera się na statystycznej ocenie wykresu dokładnego względem wykresu ograniczonego. Ponadto przedstawiono miary jakości przekształconych wykresów wartości cech.

W rozdziale czwartym przedstawiono przykłady zastosowania proponowanych metod ograniczenia wykresów wartości cech oraz metod oceny dopasowania dopuszczalnego ograniczenia wykresów. Pokazano weryfikację metody na podstawie danych eksploatacyjnych obiektu rzeczywistego, jakim jest turbozespół nr 7 w Elektrowni Kozienice S.A.. Ponadto ogólnie opisano system diagnostyczny dla turbozespołów energetycznych 200MW, w ramach którego autor rozprawy opracował oprogramowanie służące do ograniczania, sporządzania i gromadzenia wykresów wartości wybranych cech. Zamieszczono także przykładowe wyniki z przeprowadzonych badań oraz szczegółowe wnioski.

Rozdział piąty zawiera podsumowanie i najważniejsze wnioski dotyczące sformułowanych tez.

Rozdział 2

Ograniczanie wykresów wartości cech

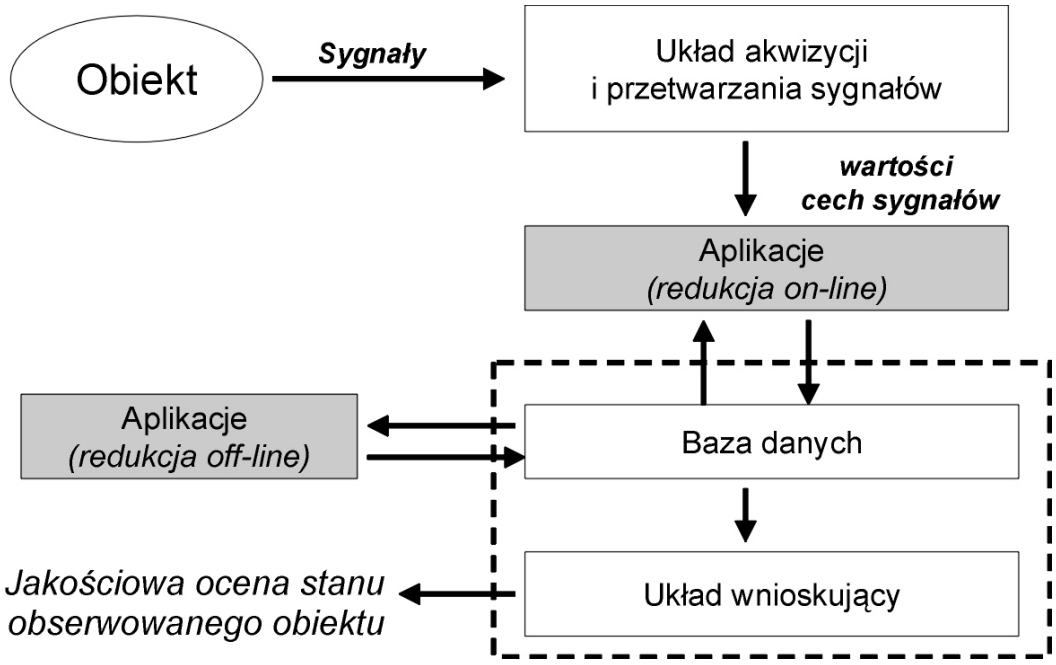
W obserwowanym obiekcie technicznym jakim jest turbozespół, liczba wyznaczanych wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych sięga kilku tysięcy. W związku z tym zaistniała potrzeba ograniczania wykresów wartości cech sygnałów. Działania zmierzające do osiągnięcia tego celu można rozpatrywać jako:

- działania na danych historycznych (off-line),
- działania na danych bieżących (on-line).

W przypadku ograniczania *off-line* dysponuje się statycznym zbiorem danych. Z kolei metody ograniczania w trybie *on-line* opierając się na danych bieżących i danych historycznych, przez co analizowany zbiór danych jest zbiorem ciągle zmieniającym się. W obu przypadkach zbiór danych jest najczęściej zbiorem niekompletnym. Na niekompletność danych może wpływać wiele czynników, między innymi ograniczony czas obserwacji obiektu oraz przypadkowy brak danych spowodowany np. uszkodzeniem toru pomiarowego.

Można wyróżnić trzy główne kierunki ograniczania zbiorów wartości cech sygnałów diagnostycznych:

1. ograniczenie liczby cech,
2. ograniczanie liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości,
3. ograniczanie liczby elementów wykresów wartości cech.



Rysunek 2.1: Dynamiczne ograniczanie wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych [31]

2.1 Ograniczanie liczby cech

W czasie badań *j-tej* maszyny wyznaczane są wartości cech, które należą do skończonego *m-tego* podzbioru $V_{j,m}$ zbioru V_j wszystkich cech opisujących zbiór sygnałów:

$$V_{j,m} = v(t) \subset V_j. \tag{2.1}$$

W procesie diagnozowania wyznaczany jest zbiór cech $V_{j,m}$, który interpretowany jest jako zbiór cech obserwowanej j-tej maszyny, dla której uwzględniany zbiór własności $W_{j,k}$ obserwowany jest za pośrednictwem zbioru sygnałów $F_{j,l}$. Zbiór cech $V_{j,m}$ jest to zbiór funkcji $v(t)$, natomiast otrzymywany zbiór wartości cech w chwili t jest zbiorem wartości funkcji $v(t) \in V_{j,m}$ zapisywanych w postaci macierzy $v_j^m(t)$. W ten sposób otrzymana macierz interpretowana jest jako zbiór współrzędnych punktu w m-wymiarowej przestrzeni wartości cech V^m [14].

Rodzina V_u zbiorów wartości cech w przestrzeni wartości cech V utworzona przez zbiory wartości cech $v_j^m(t)$ wyznaczanych dla różnych maszyn u_j oraz dla różnych chwil czasu jest zapisywana w postaci:

$$V_u = \{v_m^j(t)\}_{j,t} \subset V^m \tag{2.2}$$

Otrzymana rodzina V_u zbiorów wartości cech jest interpretowana jako rodzina zbiorów wartości cech dla jednej abstrakcyjnej maszyny, która zastępuje zbiór badanych maszyn U.

Względy praktyczne powodują, iż liczba rozpatrywanych cech powinna być ograniczona. Istnieje wiele przyczyn ograniczania liczby cech. Najczęściej ograniczenie takie jest skutkiem:

- wynikającej z analizy działania obiektu badań, decyzji o wyborze uwzględnianych cech,
- trudności pomiaru niektórych rodzajów oddziaływań obiektu na otoczenie,
- ograniczonych możliwości technicznych prowadzenia obserwacji wybranych cech sygnałów diagnostycznych,
- zewnętrznych warunków prowadzenia eksperymentu diagnostycznego,
- określonej przez cel danego eksperymentu ograniczoności liczby klas stanów obiektu,
- uwzględnienia szczegółowych wymagań związanych z potrzebami konstruowania odpowiednich klasyfikatorów [32].

Stosowane są również działania zmierzające do ograniczenia liczby cech, które polegają na:

- arbitralnym wyborze uwzględnianych cech przez osobę prowadzącą badania,
- przekształceniu rodziny wartości cech w rodzinę wartości cech głównych, a następnie na określeniu ograniczonej przestrzeni wartości cech głównych [14],
- grupowaniu cech w klasy cech podobnych i rozpatrywanie reprezentantów klas [84].

Istnieje wiele publikacji [14], [84], [4], [51], [12], [61], [90], w których szeroko opisywane są metody polegające na wstępnym przygotowaniu przestrzeni cech do postaci umożliwiającej ich redukcję (np. dla potrzeb grupowania i klasyfikacji). Metody ograniczania liczności cech można znaleźć między innymi w następujących publikacjach: [14], [84], [4], [51], [12], [72].

2.1.1 Redukcja poprzez przekształcanie

Jedną z form ograniczania liczby cech jest zastosowanie przekształcenia rodziny wartości cech V_u^m w rodzinę cech głównych G_u^m, a dalej określenie ograniczonej przestrzeni wartości cech głównych G^h. Przestrzeń wartości cech głównych może być otrzymywana poprzez przekształcenie polegające na wyznaczeniu wartości własnych i wektorów własnych macierzy kowariancji współrzędnych elementów rodziny w przestrzeni V^m. Otrzymane wektory własne określają kierunki osi przestrzeni cech głównych (Rys. 2.2). Następnie, ze zbioru wyznaczonych wektorów własnych na podstawie kryteriów, np. Kaisera i Cattela [86], dokonywany jest wybór tych wektorów własnych, którym odpowiadają największe wartości własne.

Z kolei w [14] zaproponowano następujące kryterium wyboru wektorów własnych:

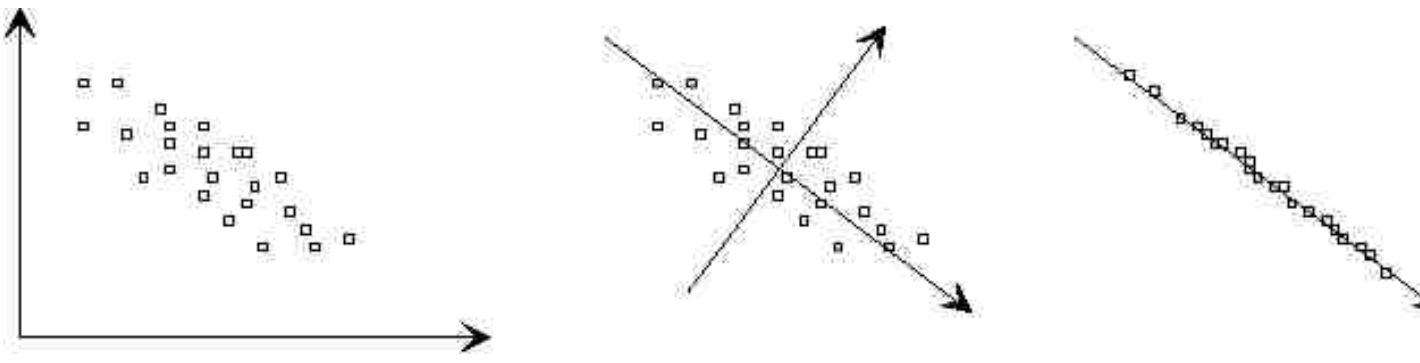
$$\frac{\lambda_h}{\lambda_1} \geqslant \beta \tag{2.3}$$

gdzie:

λ_1 - największa uwzględniana (pierwsza) wartość własna w uporządkowanym ciągu nierosnących wartości własnych,

λ_h - najmniejsza uwzględniana (h-ta) wartość własna w uporządkowanym ciągu nierosnących wartości własnych,

β - stała przyjmowana arbitralnie; $0,1 \geqslant \beta \geqslant 0,01$.



Rysunek 2.2: Ograniczenie zbioru uwzględnianych cech [28]

Innym sposobem ograniczenia zbioru rozpatrywanych cech jest poszukiwanie zależności (korelacji) pomiędzy wartościami cech, które można określać za pomocą: korelacji liniowej, korelacji rangowej Kendalla czy też korelacji rangowej

Spearmana [89]. Zaletą stosowania korelacji rangowych jest brak wymogów dotyczących skalowania wartości rozpatrywanych cech.

Do ograniczania liczby cech stosuje się również analizę czynnikową [75]. Przyjmuje się, iż wartości każdej z uwzględnianych cech są przedstawiane w postaci liniowej funkcji pewnej małej liczby nieobserwowalnych wspólnych m czynników i jednego ukrytego czynnika specyficznego. Zależność pomiędzy wartościami cech jest określana przez wspólne czynniki, natomiast zmienność poszczególnych cech określana jest przez czynniki specyficzne. Liczba czynników m wybierana jest arbitralnie. Wyznaczony model czynnikowy poddawany jest testowaniu za pomocą testu istotności χ^2. Po wyznaczeniu wspólnych czynników dokonuje się obrotu układu współrzędnych, którego osiami są wyznaczone czynniki. Najczęściej nowe czynniki umożliwiają łatwiejszą interpretację rozważanych cech. Istnieje wiele strategii, których celem jest obrót układu współrzędnych. Przykładem jest strategia *varimax*, polegająca na poszukiwaniu nowych osi współrzędnych, dla których wariancja nowych czynników jest maksymalna [55].

Grupowanie cech w klasy cech podobnych pozwala na ograniczanie liczby uwzględnianych cech. Grupowanie elementów (cech) polega na wyznaczeniu podziału pewnego zbioru elementów na podzbiory według ustalonego kryterium. Istnieje wiele publikacji poświęconych metodom grupowania [14], [84], [95] . Metody grupowania dzielą się na metody wynikające bezpośrednio lub pośrednio z metod statystycznej weryfikacji hipotez oraz heurystyczne i arbitralne metody grupowania realizowane ze względu na nie w pełni sformalizowane, bądź nieznane kryteria. Ogólnie przyjmuje się znaną liczbę podzbiorów.

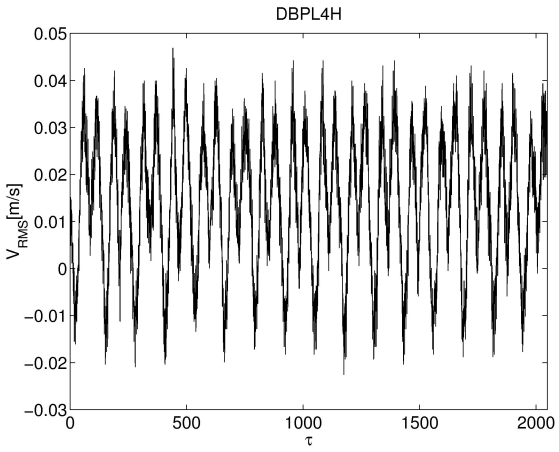
Innym zadaniem jest ograniczenie liczby cech stanowiących liczbę wymiarów przestrzeni wartości cech V^m, w której określony jest zbiór elementów V_u^m oraz rodzina $\tilde{A} = \{\tilde{A}_k : k \in [1 : l]\}$ zbiorów rozmytych [95] $\tilde{A}_k = \{(v, a_k(v)) : v \in V_u\}$ [14]. W tym celu badane są różne ograniczone przestrzenie wartości cech V^h, a następnie przeprowadza się ocenę ilościową wrażliwości (przyjętą jako uogólnienie metody analizy wariancji) rozpoznawania w tych przestrzeniach elementów rodziny $\{\tilde{A}\}$ zbiorów rozmytych $\{\tilde{A}_k\}$. Do określenia ograniczonej przestrzeni wartości cech uwzględnia się te cechy, dla których wartości wrażliwości są największe i większe od przyjętej wartości progowej. W ten sposób cechy o najmniejszej wrażliwości zostają wyeliminowane. Następnym etapem ograniczania zbioru cech jest wyznaczenie przekształcenia przestrzeni V^m w przestrzeń V^h (gdzie $h \leqslant m$). W tym celu wyznaczane są wektory własne odpowiadające największym h wartościom własnym [14].

2.1.2 Reprezentacja parametryczna

Ocenę stanu przeprowadza się na podstawie wybranych i reprezentatywnych cech. Jedną z metod ograniczania zbioru cech jest reprezentacja parametryczna. Głównym celem reprezentacji parametrycznej jest sprowadzenie cech funkcyjnych i cech punktowych wielowymiarowych o znacznej liczbie wymiarów do postaci reprezentatywnej krotki. Od wielu lat prowadzone są badania dotyczące pozyskiwania relacji diagnostycznych pomiędzy wartościami tych cech a odpowiadającymi im niesprawnościami [71].

Przebiegi czasowe

Dostarczane przez układy akwizycji przebiegi czasowe (2.3) w postaci cyfrowej są zapisywane w postaci ciągu próbek (wartości) rozpatrywanego jako blok danych o znacznym rozmiarze. W wyniku odpowiednich przekształceń tych przebiegów



Rysunek 2.3: Przykład ciągu próbek w czasie, drgań bezwzględnych obudowy łożyska turbiny parowej 200MW

otrzymuje się cechy funkcyjne i cechy punktowe, będące obrazem stanu obiektu badań. Pierwszym etapem ograniczania przebiegów czasowych jest estymacja odpowiednich cech. Można przyjąć, że estymowane cechy będą odpowiednio reprezentacją parametryczną w postaci punktu w wielowymiarowej przestrzeni cech. Kolejne wymiary tej przestrzeni reprezentują odpowiednie cechy punktowe. Do najczęściej stosowanych cech punktowych charakteryzujących przebieg czasowy można zaliczyć:

- wartość skuteczną RMS,
- wartość międzyszczytową *PeakToPeak*,
- wartość średnią,
- wariancję.

Dla przebiegów czasowych wyznacza się cechy funkcyjne, takie jak: trajektorie ruchu środka czopa, widma mocy.

Ponadto, dla zachowania pełnej informacji statystycznej, można dodatkowo uwzględnić następujące cechy:

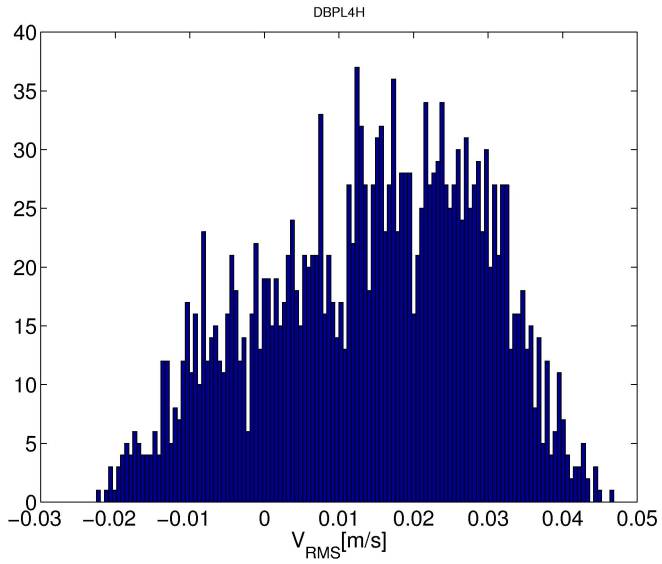
- miary tendencji centralnej (mediana, wartość modalna),
- momenty centralne trzeciego i czwartego rzędu

Dodatkowo można przechowywać histogram rozkładu przebiegu czasowego dla ustalonej liczby klas wartości. Liczba tych klas ustalana indywidualnie jest zależna od częstotliwości próbkowania przebiegu czasowego.

Gromadzenie wartości cech opisujących zmierzone przebiegi czasowe jest uzasadnione, gdyż możliwe jest przechowywanie tych informacji w znacznie dłuższym okresie niż gdyby były przechowywane same przebiegi. Ponadto wartości tych cech dostępne są natychmiast bez dodatkowych obliczeń. Problem ograniczania cech funkcyjnych, takich jak trajektorie ruchu środka czopa oraz widma, które są wyznaczane na podstawie przebiegów czasowych, jest opisany w kolejnych sekcjach tego rozdziału.

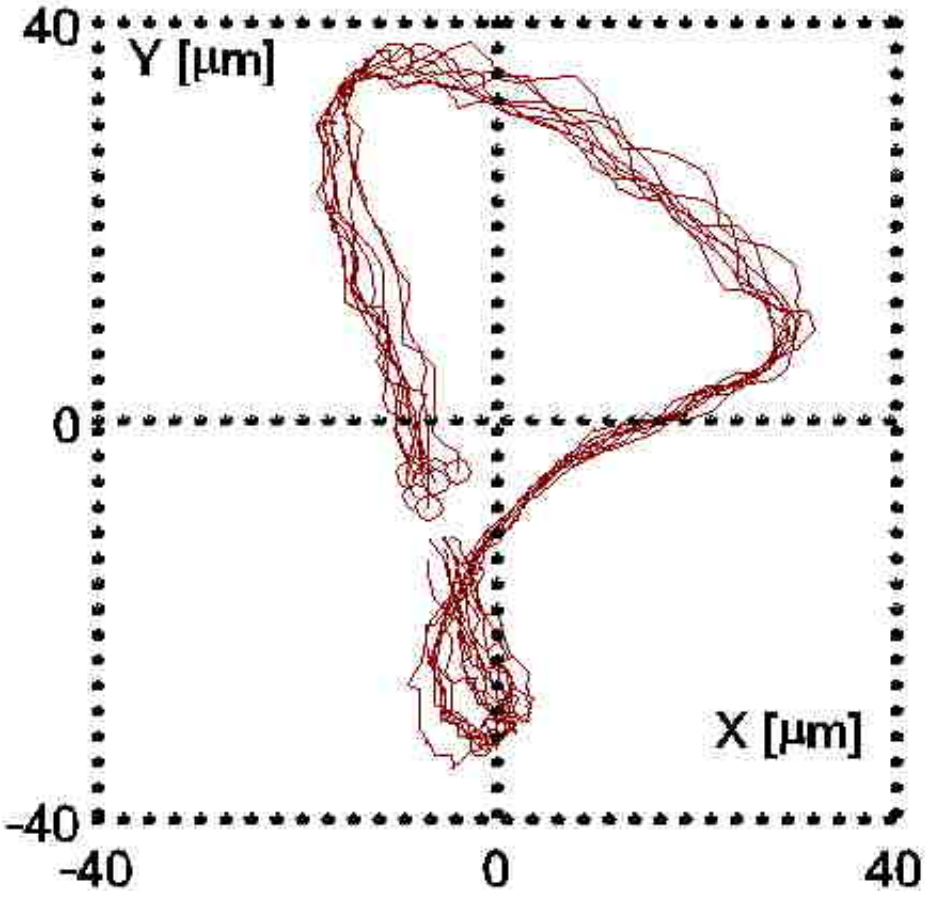
Trajektorie ruchu środka czopa

W przypadku oceny trajektorii ruchu środka czopa maszyny wirującej (zwanych potocznie orbitami) [93], [97] do najczęściej uwzględnianych cech zalicza się:



Rysunek 2.4: Przykładowy histogram przebiegu czasowego drgań bezwzględnych obudowy łożyska turbiny parowej 200MW

- wielkość trajektorii,
- zwrot kierunku wirowania punktu na trajektorii,
- położenie kątowe trajektorii względem osi pionowej,
- położenie znacznika wyróżniającego położenie kątowe wału,
- okres trajektorii,
- kształt trajektorii,
- niezmienność trajektorii w czasie [93].



Rysunek 2.5: Przykładowa trajektoria ruchu środka czopa maszyny wirnikowej [93]

Typowe relacje diagnostyczne między niesprawnościami maszyny wirnikowej a symptomami tego stanu określonymi w postaci wyróżnionych (reprezentatywnych) cech trajektorii są opisywane w literaturze [76]. Największym problemem jest identyfikacja kształtu trajektorii.

Trajektorie *harmoniczne* [93] mogą być zapisywane w postaci:

$$x(t) = A\sin(2\pi ft) + B\cos(2\pi ft) \qquad y(t) = C\sin(2\pi ft) + D\cos(2\pi ft) \quad (2.4)$$

Pozwala to na zapisanie postaci trajektorii za pomocą parametrów (cech) :

$$\widehat{x}(t) =< f, A, B, C, D > \quad (2.5)$$

gdzie f jest częstotliwością trajektorii natomiast A, B, C, D określają postać elipsy. Zapis ten może być z powodzeniem stosowany przy pozyskiwaniu relacji diagnostycznych z zastosowaniem liniowych modeli maszyn wirnikowych [60], [58]. W przypadku obiektu rzeczywistego, opis trajektorii przy pomocy zapisu (2.4) jest niemożliwy, wobec czego wymagane jest poszukiwanie cech opisujących trajektorie nieliniowe.

Trajektorie *poliharmoniczne* można wyznaczać w dziedzinie czasu za pomocą liniowej kombinacji kilku składowych trajektorii harmonicznych, gdzie w ogólnym przypadku liczba tych składowych może być nieskończona. W maszynach wirnikowych składowymi trajektorii poliharmonicznej są: trajektoria harmoniczna o częstotliwości obrotów wirnika i kolejne składowe trajektorii będące jej subharmonicznymi i superharmonicznymi.

B. Wysogląd w swojej pracy doktorskiej [93] opisuje metody reprezentacji trajektorii ruchu środka czopa dla potrzeb diagnostycznych baz danych. W pracy tej zostały zaproponowane metody identyfikacji postaci trajektorii za pomocą nowych cech. Wartości tych cech są wyznaczane zarówno w dziedzinie czasu jak i w dziedzinie częstotliwości. Szczególną zaletą proponowanej metody oceny trajektorii jest jej reprezentacja w dziedzinie częstotliwościowej w postaci widm zespolonych. Na podstawie dwustronnej gęstości widmowej wyznaczane jest zastępcze dwustronne widmo amplitudowe sygnału zespolonego.

Problemem jest identyfikacja kształtu trajektorii. Jeden ze sposobów identyfikacji kształtu trajektorii polega na porównywaniu badanej trajektorii kolejno ze wszystkimi trajektoriami wzorcowymi i określeniu, do której z nich jest ona najbardziej podobna. W tym celu stosowane są metody analizy korelacyjnej trajektorii wzorcowej z trajektorią ocenianą. Wynikiem identyfikacji postaci trajektorii

jest zbiór liczb określających podobieństwo trajektorii do poszczególnych trajektorii wzorcowych. Maksymalne wartości cech podobieństwa są wynikiem przeprowadzonej oceny [93]. W wyniku zastosowania algorytmu identyfikacji kształtu trajektrii zaproponowanego przez B. Wysogląda otrzymuje się między innymi zbiór wartości cech [92], [93]:

- maksymalna wartość modułu znormalizowanej funkcji korelacji wzajemnej, będącej oceną podobieństwa kształtu ocenianej trajektorii względem trajektorii wzorcowej,
- odchylenie standardowe argumentu funkcji zespolonej drogi kątowej ϕ ocenianej trajektorii względem trajektorii wzorcowej,
- argument funkcji korelacji dla opóźnienia odpowiadającego maksymalnej wartości modułu, będący wartością kąta obrotu między porównywanymi trajektoriami,
- moc sygnału zespolonego opisującego wielkość trajektorii, wyznaczana na podstawie funkcji autokorelacji trajektorii.

Ważnym zadaniem jest pozyskanie trajektorii wzorcowych, poprzez zastosowanie numerycznych modeli obiektu rzeczywistego w warunkach występowania określonych niesprawności. Dodatkowo, wymagane jest pozyskanie relacji diagnostycznych uwzględniających nowe cechy. Od wielu lat w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej oraz w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku [60] prowadzone są badania w zakresie odwrotnych modeli diagnostycznych [33], [35], [17], [29], [30], [62] w celu pozyskiwania nowych relacji diagnostycznych [72] dla potrzeb systemów doradczych.

Widma

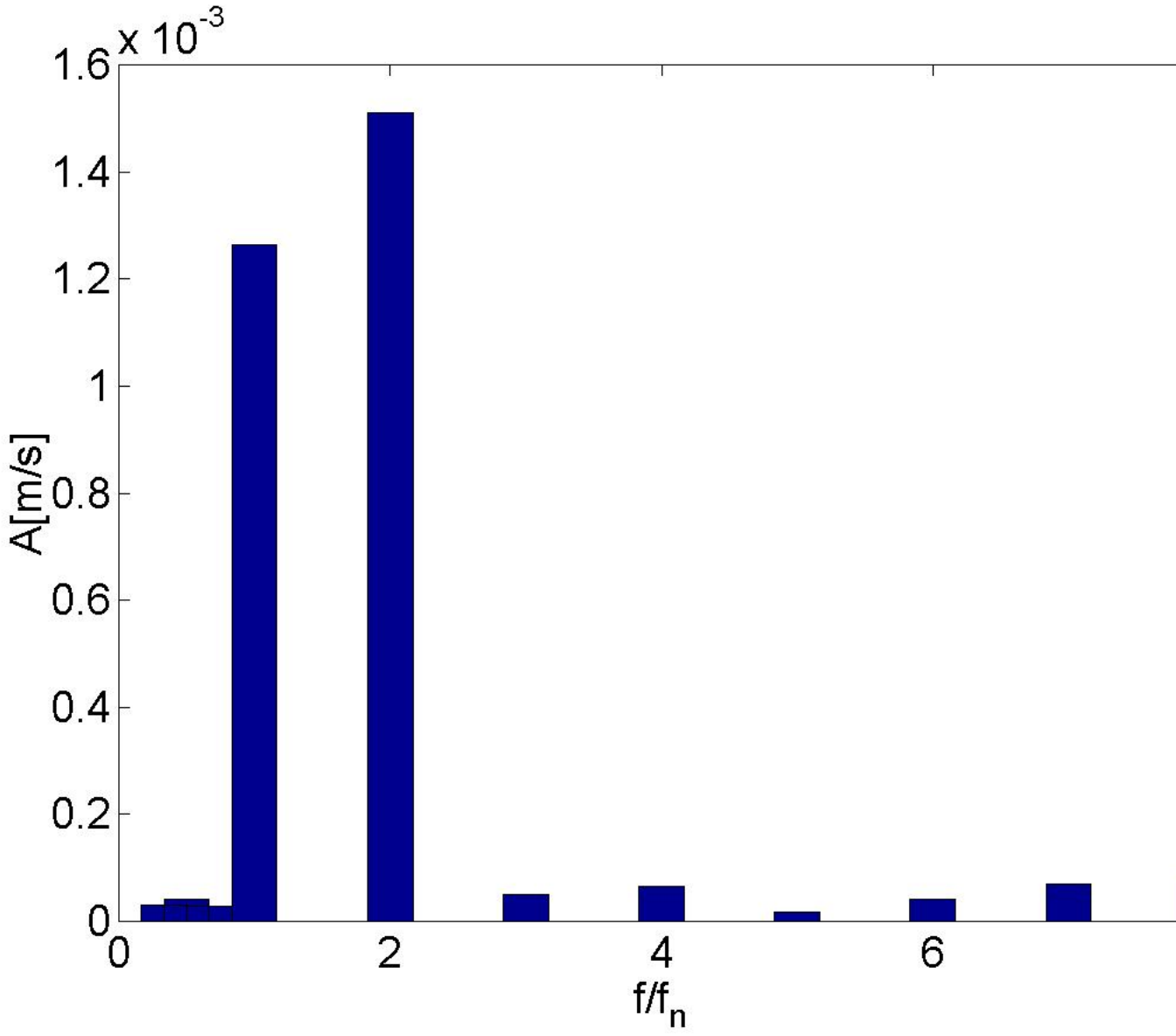
W przypadku widm amplitudowych wystarczające jest, aby znane były wartości ich cech charakterystycznych. Do nich należą: amplituda składowej podstawowej częstotliwości wirowania wału $A(f_n)$, składowych harmonicznych: $A(2f_n)$, $A(3f_n)$,..., $A(Xf_n)$, a także składowych subharmonicznych: $A(1/3f_n)$, $A(1/2f_n)$, oraz $A(2/3f_n)$.

Parametryczną postać widma można zapisać za pomocą odpowiedniej krotki wartości tych cech:

$$\widehat{x}(t) =< f_n, A(f_n), A(1/3f_n), A(1/2f_n), A(2/3f_n), A(2f_n), .., A(Xf_n) > \qquad (2.6)$$

gdzie f_n jest to częstotliwość wirowania wału (Rys.2.6). Taka krotka (2.6) w dalszym etapie gromadzenia i redukcji rozpatrywana jest jako punkt w przestrzeni wielowymiarowej. Liczba wymiarów (cech) przestrzeni zależy od:

- rodzaju obiektu,
- potrzeby prowadzonych badań,
- projektanta systemu doradczego.



Rysunek 2.6: Przykład dyskretnego widma amplitudowego prędkości drgań bezwzględnych pokrywy łożyska turbiny parowej 200MW

2.2 Ograniczanie liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości

Układy akwizycji dostarczają cechy sygnałów diagnostycznych w postaci cyfrowej, dlatego też przyjęto w tym opracowaniu, że cechy funkcyjne traktowane są jako wielowymiarowe cechy punktowe. W rozdziale omówiono zastosowanie metod klasyfikacji, reprezentacji przybliżonej, reprezentacji rozmytej, metodę kwantowania oraz zaproponowaną przez autora metodę kwantowania z histerezą do ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów diagnostycznych.

2.2.1 Klasyfikacja

Do ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów można zastosować metody klasyfikacji. Do tego celu należy zdefiniować odpowiednie wzorce, które mogą (ale nie muszą) odpowiadać określonym niesprawnościom maszyny. Przed przystąpieniem do procesu klasyfikacji wymagane jest odpowiednie przygotowanie klasyfikowanych obiektów, którymi są w tym wypadku cechy punktowe wielowymiarowe. Przygotowanie to polega na standaryzacji wielowymiarowej przestrzeni cech. Następnie należy przeprowadzić proces grupowania, a następnie klasyfikacji, w celu określenia przynależności rozpatrywanego punktu w wielowymiarowej przestrzeni cech do odpowiedniej klasy. Algorytmy grupowania i klasyfikacji są opisane w wielu publikacjach, wśród których można wymienić m.in.: [1], [2], [7], [12], [47], [46], [52], [56], [48], [95].

Przykład zastosowania metod grupowania i klasyfikacji cech sygnałów diagnostycznych został przedstawiony przez W. Cholewę w [14]. Zadanie to obejmuje następujące etapy:

- na podstawie zbioru wartości cech stanu dokonuje się wyznaczenia klas stanów,
- w wyniku podziału przestrzeni wartości cech stanu wyznacza się rodzinę reprezentantów klas stanów, dla których z kolei wyznacza się obrazy stanów,
- przeprowadza się minimalizację liczby wymiarów przestrzeni sygnałów,
- określa się (w zależności od przyjętej metody klasyfikacji) dokładną bądź rozmytą relację między obrazami sygnałów i obrazami stanów [14].

2.2.2 Kwantowanie

Kwantowanie to operacja przypisania chwilowej wartości cechy (sygnału) pewnej liczby, należącej do q-elementowego zbioru liczb zwanych *poziomami kwantyzacji* [32]. Proces kwantowania jest elementem składowym procesu dyskretyzacji sygnałów ciągłych. Stosowany może być do ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości dla wstępnie kwantowanych wartości cech punktowych. Jeżeli procesowi kwantowania podlegają pojedyncze wartości, wówczas proces ten nazywany jest *kwantowaniem skalarnym*. Natomiast gdy procesowi kwantowania podlegają co najmniej dwie równocześnie obserwowane wartości, to proces ten nazywany jest *kwantowaniem wektorowym*[1] [45]. Ogólnie ujmując problem kwantowania, zależność pomiędzy wartością wejściową x a wyjściową $\widehat{x}$ reprezentowana jest przez funkcję schodkową. Można rozróżnić dwa podstawowe rodzaje skalarnych funkcji kwantujących (inaczej *kwantyzatorów skalarnych*):

- *funkcja kwantująca z zerem* - wartości przypadające w przedziale zawierającym zero są zapisywane jako zero (Rys.1),

$$\widehat{x} = \text{round}\left(\frac{x}{\delta}\right)\delta \tag{2.7}$$

- *funkcja kwantująca bez zera* - wartości sąsiadujące z zerem z lewej strony są zapisywane jako ujemne a wartości sąsiadujące z prawej strony są zapisywane jako dodatnie (Rys.1).

$$\widehat{x}_i = \begin{cases} \text{floor}\left(\frac{x}{\delta}\right)\delta & \text{dla} \quad x < 0 \\ \text{ceil}\left(\frac{x}{\delta}\right)\delta & \text{dla} \quad x > 0 \\ 0 & \text{dla} \quad x = 0 \end{cases} \tag{2.8}$$

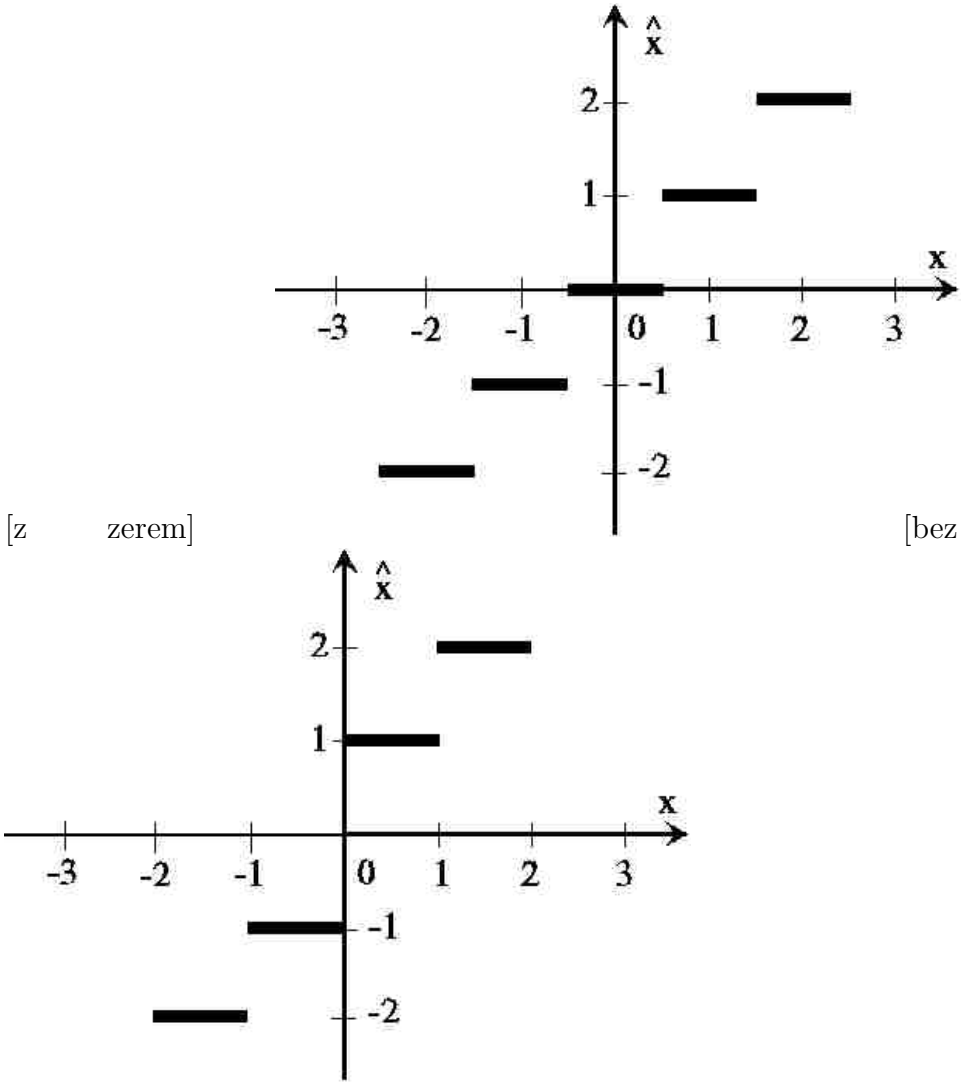
gdzie:

$round(y)$ - funkcja zaokrąglającą argument y do najbliższej wartości całkowitej.

$floor(y)$ - funkcja zaokrąglająca argument y do najbliższej wartości całkowitej w kierunku $-\infty$,

$ceil(y)$ - funkcja zaokrąglająca argument y do najbliższej wartości całkowitej w kierunku $+\infty$,

δ - szerokość pasma kwantowania wartości cechy x.



Rysunek 2.7: Skalarne funkcje kwantujące

Powszechnie stosowaną metodą ograniczania liczby rozróżnianych wartości jest *kwantowanie skalarne równomierne z zerem*. W wyniku ograniczenia liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości wykresu wartości cech punktowych jednowymiarowych przez kwantowanie, otrzymywane są nowe wartości $\widehat{x}$ będące przybliżeniem dokładnych wartości chwilowych x, z tolerancją równą połowie szerokości pasma kwantowania (2.7).

$$x(t) = \widehat{x}(t)^{\pm 0.5\delta} \tag{2.9}$$

[1]Występująca w literaturze nazwa *kwantowanie wektorowe* nie jest w pełni poprawna, ale dla uniknięcia nieporozumień będzie tutaj stosowana

Dla przyjętej szerokości pasma kwantowania δ nowe wartości cech mogą być zapisywane (w diagnostycznej bazie danych) w następującej postaci:

$$x(t) =< \widehat{x}(t), t, \delta > \tag{2.10}$$

gdzie t jest to czas (chwila) obserwacji wartości cechy x.

Efektem ubocznym procesu kwantowania jest *szum kwantowania* e_Q, określany jako różnica pomiędzy wartością przybliżoną a wartością dokładną:

$$e_Q = \widehat{x} - x \tag{2.11}$$

W przypadku, kiedy prawdopodobieństwo (częstość) występowania wartości w jednym przedziale jest większe od prawdopodobieństwa występowania w innym przedziale, to uzasadnione jest stosowanie większej liczby poziomów kwantowania w pierwszym przedziale niż w drugim. Takie postępowanie prowadzi do zróżnicowanego szumu kwantowania, gdyż przedziały kwantowania są różnej wielkości. Opisane działania charakteryzują *kwantowanie nierównomierne* [45].

Poza wyróżnionymi metodami kwantowania istnieją jeszcze inne (np. kwantyzatory dynamiczne), które nie będą poruszane w dalszej części rozprawy, jednakże są one szeroko opisywane zarówno w wielu zwartych publikacjach [45], [83], [81] jak i miesięcznikach poświęconych technice komputerowej (np. [80], [94], [96]).

Opisane metody kwantowania można zastosować do ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów diagnostycznych zarówno w trybie *on-line* jak i w trybie *off-line*. W dalszej części rozprawy skoncentrowano się na zastosowaniu metody kwantowania skalarnego do ograniczania stopnia szczegółowości wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych. Ponadto przyjęto, że każdą cechę punktową wielowymiarową można rozpatrywać z osobna (mając na uwadze zależność pomiędzy wymiarami tej przestrzeni). Takie założenie spowodowane jest tym, iż większość danych dostarczanych przez układy akwizycji sygnałów jest w postaci punktowej wielo- bądź jednowymiarowej [31].

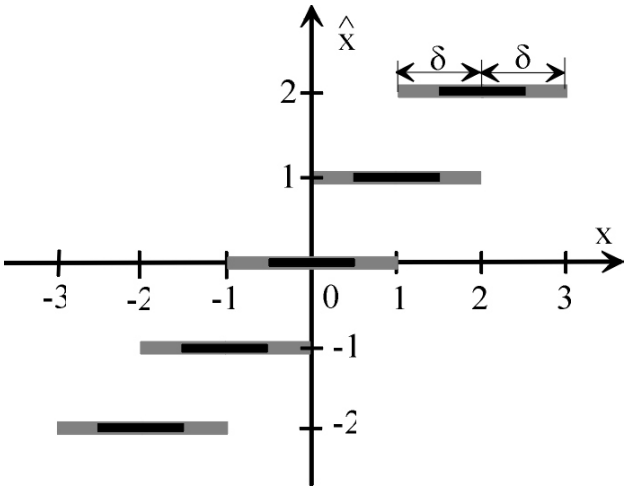
2.2.3 Kwantowanie z histerezą

Dokonując kwantowania wartości cechy w kolejnych chwilach (makro), gdy wartości te oscylują wokół sąsiadujących pasm kwantowania zauważono, że po kwantowaniu oscylacje te zostaną zachowane. W szczególnym przypadku, gdy oscylacje będą występowały na granicach klas jakościowych, będzie to miało niekorzystny

wpływ na proces wnioskowania o stanie obserwowanego obiektu. W celu eliminacji omawianego szumu kwantowania występującego na granicach pasm kwantowania, autor rozprawy zaproponował funkcję kwantowania uwzględniającą histerezę zmian w czasie wartości cechy, w wyniku czego bieżąca wartość cechy jest wyznaczana z uwzględnieniem wartości cechy w chwili poprzedniej wyznaczonej w procesie kwantowania. Zaproponowana metoda kwantowania została nazwana *kwantowaniem z histerezą*, gdyż pojęcie histerezy określane jest jako *zjawisko zależności aktualnego stanu układu stanów od stanu w poprzedzających chwilach.* Funkcję kwantowania z histerezą opisuje następujące równanie:

$$\widehat{x}(t) = \begin{cases} \widehat{x}(t-1) & \text{dla} \quad \widehat{x}(t-1) - \delta \leqslant x(t) \leqslant \widehat{x}(t-1) + \delta \\ \\ round\Big(\frac{x(t)}{\delta}\Big)\delta & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \tag{2.12}$$

gdzie δ oznacza szerokość pasma kwantowania.
Rysunek 2.8 przedstawia graficzną postać funkcji kwantowania z histerezą.

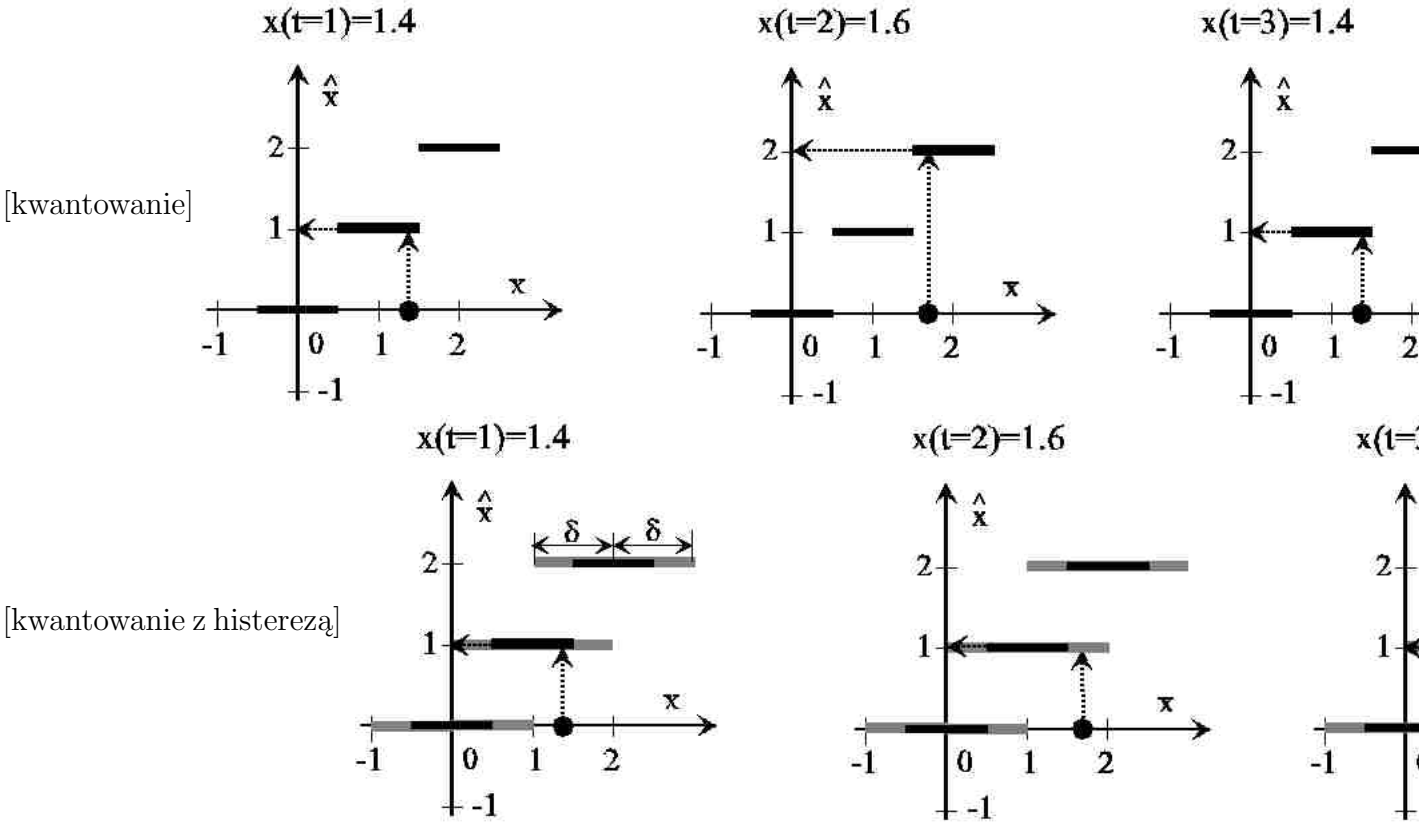


Rysunek 2.8: Funkcja kwantowania z histerezą

Metoda kwantowania z histerezą została opracowana dla potrzeb ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów diagnostycznych. Ponadto zadaniem kwantowania z histerezą jest ograniczanie szumów kwantowania występujących na granicach pasm kwantowania wtedy, gdy kwantowane są wartości cech sygnałów, tzn. wtedy gdy sygnał poddany kwantowaniu składa się z interesującej nas składowej o bardzo małej prędkości zmian (o niskich częstotliwościach) i szumu w paśmie o wyższych częstotliwościach.

Zalety metody kwantowania z histerezą względem metody kwantowania przedstawiono na przykładzie (Rys.2.9). Rozpatrzmy przypadek, kiedy stosowana jest

metoda kwantowania (Rys.2.2.3). Przyjmijmy, że wartość cechy $x(t = 1) = 1,4$,



Rysunek 2.9: Przykład porównujący metodę kwantowania względem metody kwantowania z histerezą

wówczas po kwantowaniu nowa wartość cechy wynosi $\widehat{x}(t = 1) = 1$. Dla wartości cechy w kolejnej chwili $x(t = 2) = 1,6$, nowa wartość cechy $\widehat{x}(t = 2) = 2$. Następna wartość cechy wynosi $x(t = 3) = 1,4$ przez co nowa wartość cechy $\widehat{x}(t = 3) = 1,0$. Przykład ten wyraźnie pokazuje szum kwantowania występujący na granicach pasm kwantowania. W przypadku stosowania metody kwantowania z histerezą (Rys.2.2.3) szum występujący na granicach pasm kwantowania został usunięty, przez co $\widehat{x}(t = 1,2,3) = 1$.

2.2.4 Reprezentacja przybliżonych wartości cech

Wartości cech sygnałów diagnostycznych wyznaczane są m.in. za pośrednictwem układów pomiarowych, przez co:

- określane są w różnych jednostkach,
- mogą znacznie różnić się między sobą,

- nie są przystosowane do bezpośredniego porównywania.

Definiowanie reguł diagnostycznych dla tak określonych wartości jest możliwe, wymaga jednak indywidualnego uwzględnienia każdego sygnału. Stosując reguły uogólnione (definiowane dla klas wartości cech sygnałów), przyjęto (w systemie DT200 [23]), że reguły te definiowane będą dla przybliżonych wartości cech. Sprowadzenie przestrzeni cech do ujednoliconej (uogólnionej) postaci pozwala na znaczną redukcję budowanych reguł. Możliwość taką daje reprezentacja przybliżonych wartości cech. Do ich definiowania wymagane jest ustalenie kryteriów, na podstawie których wartości dokładne będą przekształcane do postaci przybliżonej. Podstawowym kryterium jest liczba rozróżnianych klas, gdzie minimalną liczbą są dwie klasy <*wartość dopuszczalna, wartość niedopuszczalna*>, natomiast maksymalną liczbę rozróżnianych klas należy ustalić w zależności od potrzeb systemu. Należy jednak uwzględnić gradację wartości przybliżonych, gdyż wraz ze wzrostem liczby klas wzrasta liczba definiowanych reguł, a tym samym złożoność systemu. Może to w końcowym efekcie znacznie wydłużyć czas oczekiwania na wynik wnioskowania. Najczęściej przyjmuje się 3 klasy wartości <*wartość normalna, ostrzeżenie, wartość niedopuszczalna*>. W opracowanym systemie diagnostycznym [22], [23] w celu ustalenia sposobu reprezentacji jednowymiarowych wartości cech sygnałów diagnostycznych przyjęto, że mogą występować następujące grupy wartości cech sygnałów, dla których [23]:

1. przedział wartości dopuszczalnych ograniczony jest jednostronnie i które wymagają określenia jednej górnej wartości krytycznej,
2. przedział wartości dopuszczalnych ograniczony jest jednostronnie i które wymagają określenia jednej dolnej wartości krytycznej,
3. przedział wartości dopuszczalnych ograniczony jest dwustronnie i które wymagają określenia dwóch wartości krytycznych,
4. nie ogranicza się jawnie przedziału wartości dopuszczalnych.

W celu uogólnienia rozpatrywanych przypadków przyjęto, że wszystkie rejestrowane wartości cech można rozpatrywać jako wartości cech grupy sygnałów, które wymagają określenia dwóch wartości krytycznych. Ustalono, że zakres wartości każdej cechy będzie podzielony na części określone przez następujące wartości progowe [23]:

MH - wartość nieoczekiwanie duża,

AH - alarm górny,

WH - górna wartość dopuszczalna (ostrzeżenie),

ZH - wartość normalna duża,

ZL - wartość normalna mała,

WL - dolna wartość dopuszczalna (ostrzeżenie),

AL - alarm dolny,

ML - wartość nieoczekiwanie mała.

Tabela 2.1: Podział na klasy przybliżonych wartości [23]

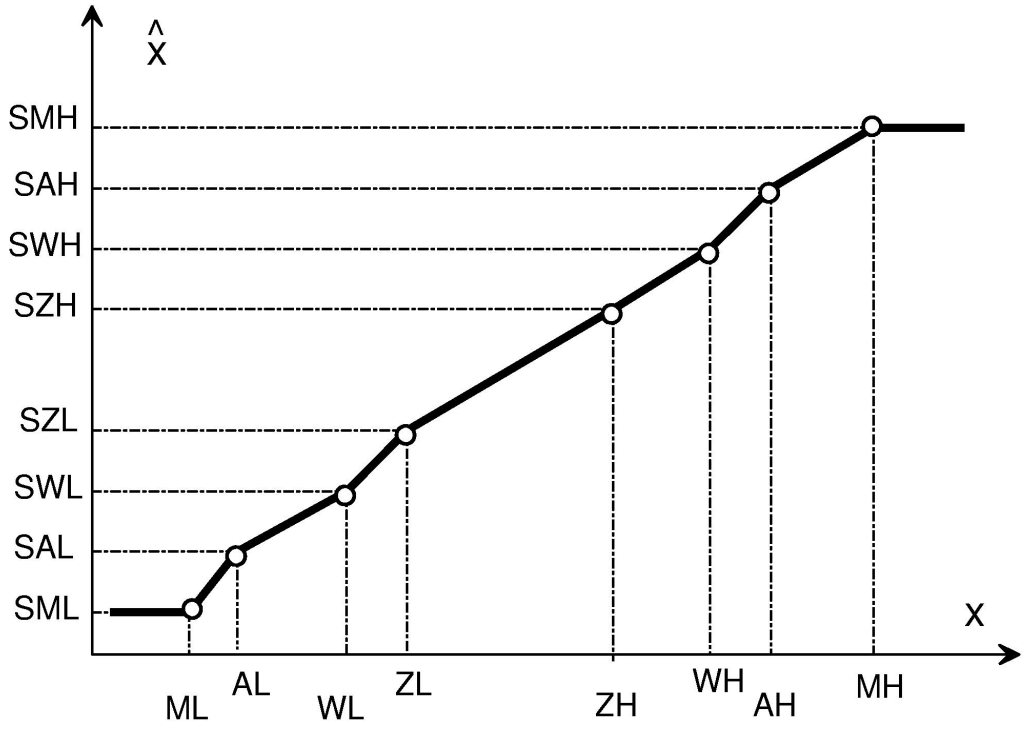
warunek klasyfikacji	identyfikator klasy	nazwa klasy
$x \geqslant AH$	1	wartość niedopuszczalnie duża
$AH > x \geqslant WH$	3	wartość bardzo duża
$WH > x \geqslant ZH$	5	wartość dopuszczalnie duża
$ZH > x \geqslant ZL$	7	wartość normalna
$ZL > x \geqslant WL$	5	wartość dopuszczalnie mała
$WL > x \geqslant AL$	3	wartość bardzo mała
$AL > x$	1	wartość niedopuszczalnie mała

Te wartości krytyczne pozwalają na przyjęcie klas przybliżonych wartości określanych indywidualnie dla każdej cechy (Tab. 2.1).

Ze względu na różnorodność skal rozpartywanych wartości cech można przeprowadzić ich normalizację poprzez przekształcenie odcinkami liniowo, tak aby wartościom progowym odpowiadały wartości skalowane (Tab. 2.2).

Tabela 2.2: Definicja klas przybliżoych wartości cech [23]

nazwa wartości progowej	nazwa skalowanej wartości progowej	skalowana wartość progowa
MH	SMH	30000
AH	SAH	22500
WH	SWH	15000
ZH	SZH	7500
ZL	SZL	-7500
WL	SWL	-15000
AL	SAL	-22500
ML	SML	-30000



Rysunek 2.10: Skalowanie wartości cech sygnałów [23]

Wartości otrzymane w wyniku skalowania ograniczone są przedziałem (SML, SMH). Skalowanie wartości cech przedstawia następująca zależność [23]:

$$\widehat{x}(x) = \begin{cases} SMH & \text{dla} \quad x \geqslant MH \\ SAH + \frac{(x-AH)*(SMH-SAH)}{(MH-AH)} & \text{dla} \quad MH > x \geqslant AH \\ SWH + \frac{(x-WH)*(SAH-SWH)}{(AH-WH)} & \text{dla} \quad AH > x \geqslant WH \\ SZH + \frac{(x-ZH)*(SWH-SZH)}{(WH-ZH)} & \text{dla} \quad WH > x \geqslant ZH \\ SZL + \frac{(x-ZL)*(SZH-SZL)}{(ZH-ZL)} & \text{dla} \quad ZH > x \geqslant ZL \\ SWL + \frac{(x-WL)*(SZL-SWL)}{(ZL-WL)} & \text{dla} \quad ZL > x \geqslant WL \\ SAL + \frac{(x-AL)*(SWL-SAL)}{(WL-AL)} & \text{dla} \quad WL > x \geqslant AL \\ SML + \frac{(x-ML)*(SAL-SML)}{(AL-ML)} & \text{dla} \quad AL > x \geqslant ML \\ SML & \text{dla} \quad ML > x \end{cases} \tag{2.13}$$

Tak przyjęty sposób skalowania umożliwia rejestrowanie przybliżonych wartości cech w postaci liczb całkowitych, przez co możliwe staje się oszczędne gospodarowanie pamięcią masową. Ponadto, zawsze można odtworzyć wartość cechy przed skalowaniem z odpowiednio wysoką dokładnością.

Krytyczne wartości progowe oraz wartości ograniczające należy przyjmować indywidualnie dla każdego sygnału [93]. Najczęściej wartości te przyjmuje się na podstawie norm i zaleceń. W przypadku maszyn wirnikowych, kryteria oceny stanu tych maszyn na podstawie drgań bezwzględnych obudów łożysk i drgań względnych czopa wału w łożysku zostały opisane w normach (Tab. 2.3 i Tab.2.4).

Istnieje także wiele prac opisujących metody wyznaczania wartości granicznych [10], [78], [79], [9] oraz wyznaczonych wartości granicznych dla wybranych obiektów technicznych [77]. Przykładowo, dla turbin parowych, graniczne poziomy drgań można wyznaczać na podstawie analizy trendów dla drgań, obejmującej kilka lat eksploatacji [78]. Ponadto stosowane są metody oparte na niezawodności symptomowej, których zastosowanie opisano w pracy [50]. W tym przypadku wartości graniczne wyznaczane są na podstawie rozkładu zmierzonych (w

Tabela 2.3: Wykaz norm i zaleceń stosowanych do oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych na podstawie drgań bezwzględnych obudowy łożyska [9]

Wymagania dla maszyn nowych i oddanych po remoncie	Ocena stanu dokonywana podczas działania maszyny	Ocena stanu dokonywana przez układy ciągłego monitorowania
VDI 2056 (Grupa K/M) ISO 2372/1974 (Klasy I/II) DIN 45665 DIN/ISO 2373 IEC 34-14 CEN HD 347 API 541, API 546	VDI 2056 (wszystkie grupy) ISO 2372/1974 (Klasy I do IV) DIN/ISO 3945	ISO 2372 - 1 do 3

Tabela 2.4: Wykaz norm i zaleceń stosowanych do oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych na podstawie drgań względnych czopa wału w łożysku [9]

Wymagania dla maszyn nowych i oddanych po remoncie	Ocena stanu dokonywana podczas działania maszyny	Ocena stanu dokonywana prze układy ciągłego monitorowania
API 541 API 546 API 611 API 612 API 617	VDI 2059 - 1 do 5 ISO 7919 - 1 do 4 (5)	VDI 2059 -2 do 4 ISO 7919 - 1 do 4 (5)

warunkach rzeczywistych) wartości symptomu przy uwzględnieniu założeń związanych z eksploatacją danego obiektu [50]. Ponadto krańcowe wartości MH i ML określa się, biorąc pod uwagę informacje o torze pomiarowym.

Opisana metoda (zaproponowana przez W. Cholewę [23]) reprezentacji przybliżonych wartości cech sygnałów diagnostycznych, poprzez ujednolicenie skal dla różnych przestrzeni wartości cech umożliwia budowanie reguł uogólnionych. Dzięki temu uzyskuje się znaczną redukcję reguł. Konieczne staje się ustalenie wartości granicznych określających klasy wartości. Do tego celu można zastosować normy, zalecenia producenta, metody wyznaczania wartości granicznych oraz skorzystać z doświadczenia specjalisty.

2.2.5 Zastosowanie liczb rozmytych

Stosowanie określeń niedokładnych (nieprecyzyjnych) w postaci np. *około 10*, *dużo więcej niż 7*, *duża liczba*, jest często wystarczające do podjęcia decyzji o dalszej eksploatacji obserwowanego (najczęściej w sposób ciągły) obiektu. Rozwijana w ostatnich latach teoria zbiorów rozmytych wprowadzona przez L.A Zadeha [95] umożliwia definiowanie i stosowanie wartości niedokładnych [14].

Zbiór rozmyty $\widetilde{A}$ określony w pewnej przestrzeni $X = \{x\}$ zapisuje się jako zbiór par [95]:

$$\widetilde{A} = \{(x, \mu_A(x))\}, \bigwedge_{x \in X} \tag{2.14}$$

gdzie:

$$\mu_A : X \longrightarrow [0, 1] \tag{2.15}$$

jest *funkcją przynależności*, która każdemu elementowi przestrzeni X przyporządkowuje stopień przynależności do danego zbioru rozmytego: od braku przynależności ($\mu_A(x) = 0$) przez przynależność częściową ($0 < \mu_A(x) < 1$) do całkowitej przynależności ($\mu_A(x) = 1$) [56]. W porównaniu do klasycznej definicji zbioru, zbiór rozmyty charakteryzuje się tym, iż oprócz alternatywy *przynależność - brak przynależności* występują przypadki przynależności częściowej. Teoria zbiorów rozmytych może służyć do formalnego ujmowania i ilościowego wyrażenia pojęć nieostrych (przybliżonych, niedokładnych) i niejednoznacznych.

W celu ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów diagnostycznych można stosować wartości niedokładne w postaci *liczb rozmytych*. Dzięki temu możliwe staje się zapisywanie wartości dokładnych w postaci rozmytej (niedokładnej) np. $<$ *Temperatura skroplin za XW6, około 190° C* $>$.

Liczbą rozmytą $\widetilde{A}$ w zbiorze liczb rzeczywistych R, $A \subseteq R$ nazywa się zbiór rozmyty o ciągłej funkcji przynależności [56].

$$\mu_A : R \longrightarrow [0, 1] \tag{2.16}$$

Na liczbach rozmytych można przeprowadzać operacje dwuargumentowe, np.: dodawanie, odejmowanie, mnożenie, dzielenie. W celu przyspieszenia wykonywania tych operacji zaproponowana została przez Dubois i Prade'a trójparametryczna reprezentacja liczb rozmytych [46], [56]. Liczba rozmyta [56] $A \subseteq R$ jest liczbą rozmytą L-R wtedy i tylko wtedy, gdy [56]:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \mathcal{L}(\frac{m-x}{\alpha_A}) & \alpha_A > 0, \bigwedge_{x<m} \\ \mathcal{R}(\frac{x-m}{\beta_A}) & \beta_A > 0, \bigwedge_{x>m} \end{cases} \tag{2.17}$$

gdzie:

$\mathcal{L}$ - lewostronna funkcja odniesienia,

$\mathcal{R}$ - prawostronna funkcja odniesienia,

m - wartość średnia $\mu_A(m) = 1$,

α_A - rozrzut lewostronny,

β_A - rozrzut prawostronny.

Jeżeli $\alpha_A = \beta_A = 0$, to liczba rozmyta A staje się liczbą nierozmytą m.

Na podstawie zapisu (2.17), liczbę rozmytą charakteryzują trzy parametry m, α_A, β_A:

$$\widetilde{A} = (m_A, \alpha_A, \beta_A) \tag{2.18}$$

Najczęściej stosowane funkcje odniesienia typu $\mathcal{L}(), \mathcal{R}()$ [46], [56]:

$$\mathcal{L}(x) = e^{-|x|^p} \qquad \text{dla} \qquad p > 1 \tag{2.19}$$

$$\mathcal{L}(x) = 0 \vee (1 - |x|^p) \qquad \text{dla} \qquad p > 1 \tag{2.20}$$

$$\mathcal{L}(x) = \frac{1}{1 + |x|^p} \qquad \text{dla} \qquad p > 1 \tag{2.21}$$

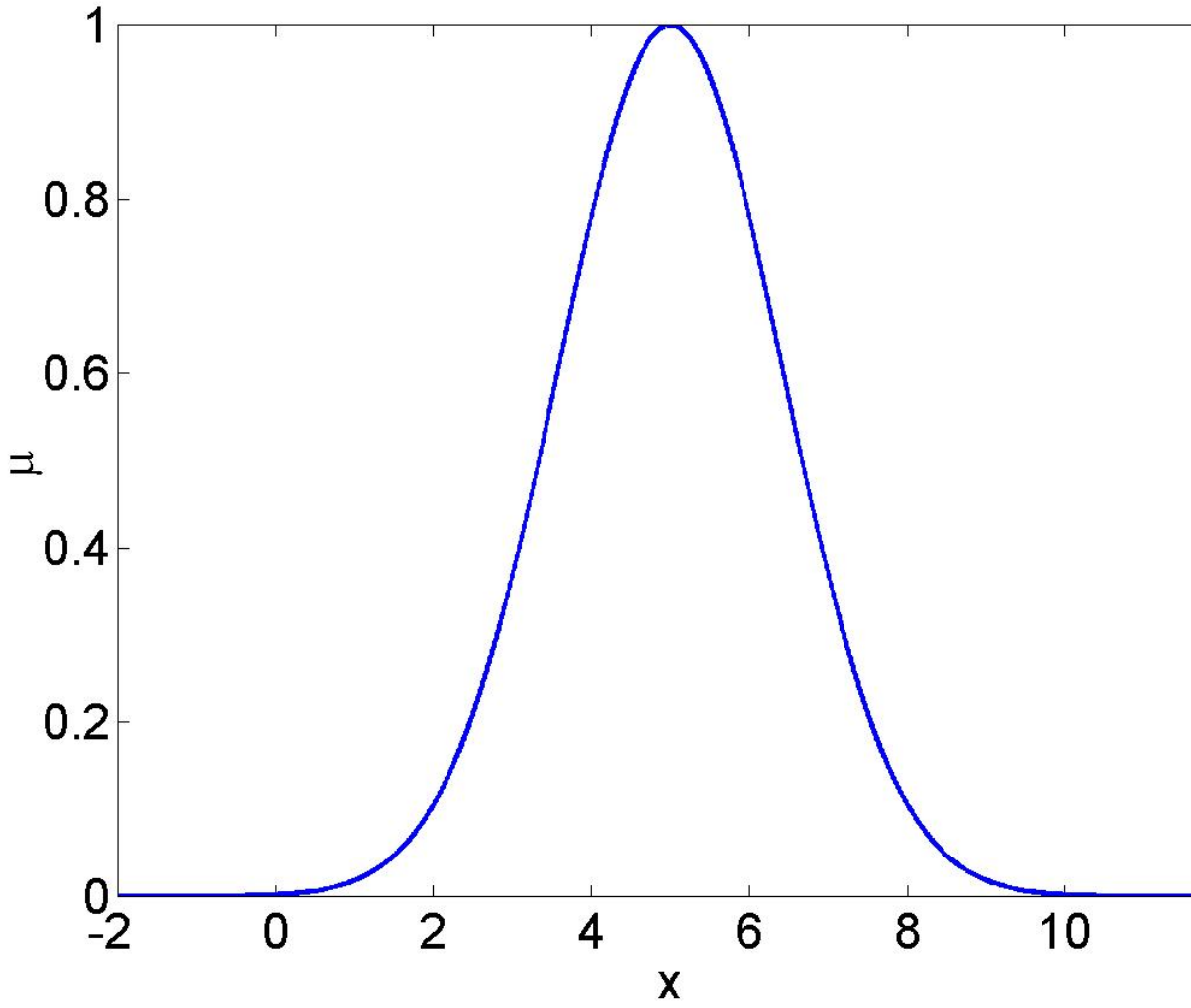
$$\mathcal{L}(x) = \begin{cases} 1 & \text{dla} \qquad x \in [-1, +1], \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases} \tag{2.22}$$

Postać funkcji przynależności liczby rozmytej *prawie 5* definiowanej jako: $\widetilde{A}$=(5,2,2) dla $\mathcal{L}(x) = \mathcal{R}(x) = 0 \vee (1 - |x|^p)$ przedstawiono na rysunku 2.11

Przez zastosowanie operacji obcinania zbioru rozmytego (którym jest rozpatrywana liczba rozmyta) można przekształcić liczby rozmyte do postaci dokładnej. Operacja obcinania zbioru rozmytego na poziomie q polega na następującym przekształceniu jego funkcji charakterystycznej:

$$\mu_{CUT}(x) = \begin{cases} 1 & \text{dla} \qquad \mu(x) \geqslant q, \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach.} \end{cases} \tag{2.23}$$

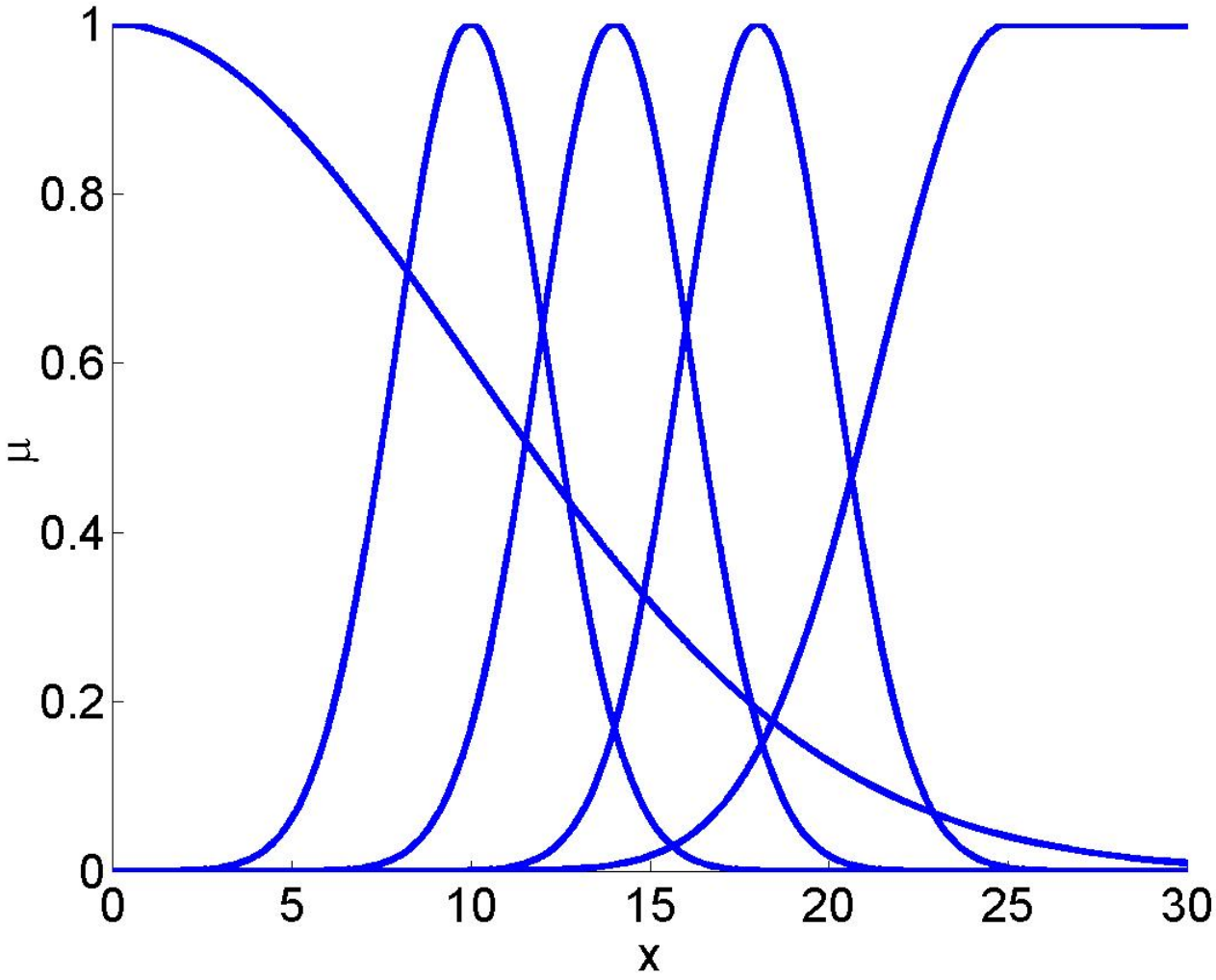
W celu ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów diagnostycznych można definiować rodzinę liczb rozmytych będących reprezentantami odpowiednich klas wartości cechy. Cechą charakterystyczną takiej rodziny jest możliwość nierównomiernego podziału zakresu wartości rozpatrywanej cechy. Przykładowo, jeżeli wartości cechy są bliskie zeru, bądź takie, które



Rysunek 2.11: Funkcja przynależności liczby rozmytej *około 5*, $A = (5, 2, 2)$

można uznać za zero, wówczas wartości te mogą być reprezentowane liczbą rozmytą *około zero*. Podobnie wszystkie wartości wykraczające poza górną wartość graniczną x_{gran} mogą być reprezentowane jako: *powyżej* x_{gran}.

Rodzinę liczb rozmytych {*około 0, około 10, około 14, około 18, powyżej 25*} reprezentujących klasy wartości pewnej cechy przedstawiono na Rys. 2.12.



Rysunek 2.12: Przykładowa rodzina liczb rozmytych będących reprezentantami klas wartości cechy

Opisana metoda stosowania liczb rozmytych do ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech może przynieść wymierne korzyści przy ograniczaniu danych uznanych za historyczne oraz przy definiowaniu i stosowaniu reguł uogólnionych.

2.3 Ograniczanie liczby elementów wykresów wartości cech

W rozdziale tym omówiono zagadnienia związane z ograniczeniem liczby elementów wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych wyznaczanych w czasie *makro*.

2.3.1 Częstość pobierania danych

Powszechną metodą ograniczania liczby elementów wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych jest odpowiedni dobór częstości pobierania danych. Zbyt mała częstość pobierania danych może spowodować brak dostatecznej informacji o zjawiskach zachodzących w obiekcie (*dziury* w danych). Natomiast duża częstość pobieranie danych (wartości cech) może spowodować:

- szybkie zapełnienie się bazy danych,
- spowolnienie lokalnej sieci komputerowej, którą dostarczane są dane,
- znaczne spowolnienie działania systemu nadzoru lub jego zawieszenie się.

Mając na uwadze charakter obserwowanych zjawisk (przebiegu procesów) jak również intensywność zmian zachodzących w obserwowanym obiekcie, należy odpowiednio dobrać częstość dokonywania pomiarów. Minimalna wartość kroku czasowego jest zależna od technicznych możliwości systemu zbierania, przetwarzania i gromadzenia danych. Podczas obserwacji dużych obiektów, jakimi są turbozespoły (cykl pracy mierzony jest w tygodniach lub miesiącach), można zauważyć, że mogą występować przerwy, różniące się czasem trwania i zakresem zmian stanu, występującym w obserwowanej maszynie. Jeżeli zmiana stanu nastąpiła w czasie postoju maszyny, wówczas wystąpi skokowa zamiana pierwszej wartości po postoju względem ostatniej wartości przed postojem.

Częstość pobierania danych może być różna dla róznych cech sygnałów. Częstość ta zwykle jest związana z bieżącymi potrzebami systemu wnioskującego. W związku z tym wymagane jest indywidualne określenie dopuszczalnych przerw pomiędzy kolejnymi pomiarami:

$$t - (t-1) < \Delta t_g \tag{2.24}$$

gdzie Δt_g jest to dopuszczalna przerwa pomiędzy kolejnymi pomiarami.

Jeżeli warunek (2.24) jest spełniony, wówczas zachowana jest ciągłość danych. W przeciwnym wypadku możliwe jest uzupełnienie brakujących danych poprzez zastosowanie np. metod interpolacyjnych. Ważne jest, aby uzupełniając dane, uwzględniano informacje o fazie pracy obiektu badań.

2.3.2 Sklejanie

Dla potrzeb dynamicznych systemów doradczych [25], których cechą charakterystyczną jest wnioskowanie w zmieniającym się otoczeniu, zapis (1.3) jest niewystarczający. Wymaga to wprowadzenia dodatkowej informacji o chwili, w której występowała wyznaczona wartość cechy (chwila, w jakiej rozpatrywany jest obiekt) [24]:

$$x =< \ obj, \ nam(x), \ val(x), t \ > \tag{2.25}$$

Oprócz ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów można przeprowadzać ograniczenie liczby elementów wykresu wartości cech sygnałów. Przykładem takiej metody jest sklejanie elementów wykresu wartości cechy. Metoda ta została zaproponowana przez W.Cholewę w ramach realizacji projektu PBZ-038-06 [19], [31]. Jeżeli poczyni się założenie, iż pomiędzy kolejnymi pomiarami wartości cechy nie nastąpiła zamiana wartości, wówczas czas można zapisać w postaci odcinka $[t_p, t_k)$. W związku z tym zapis (2.25) przyjmuje postać:

$$x =< \ obj, \ nam(x), val(x), [t_p, t_k) > \tag{2.26}$$

gdzie:

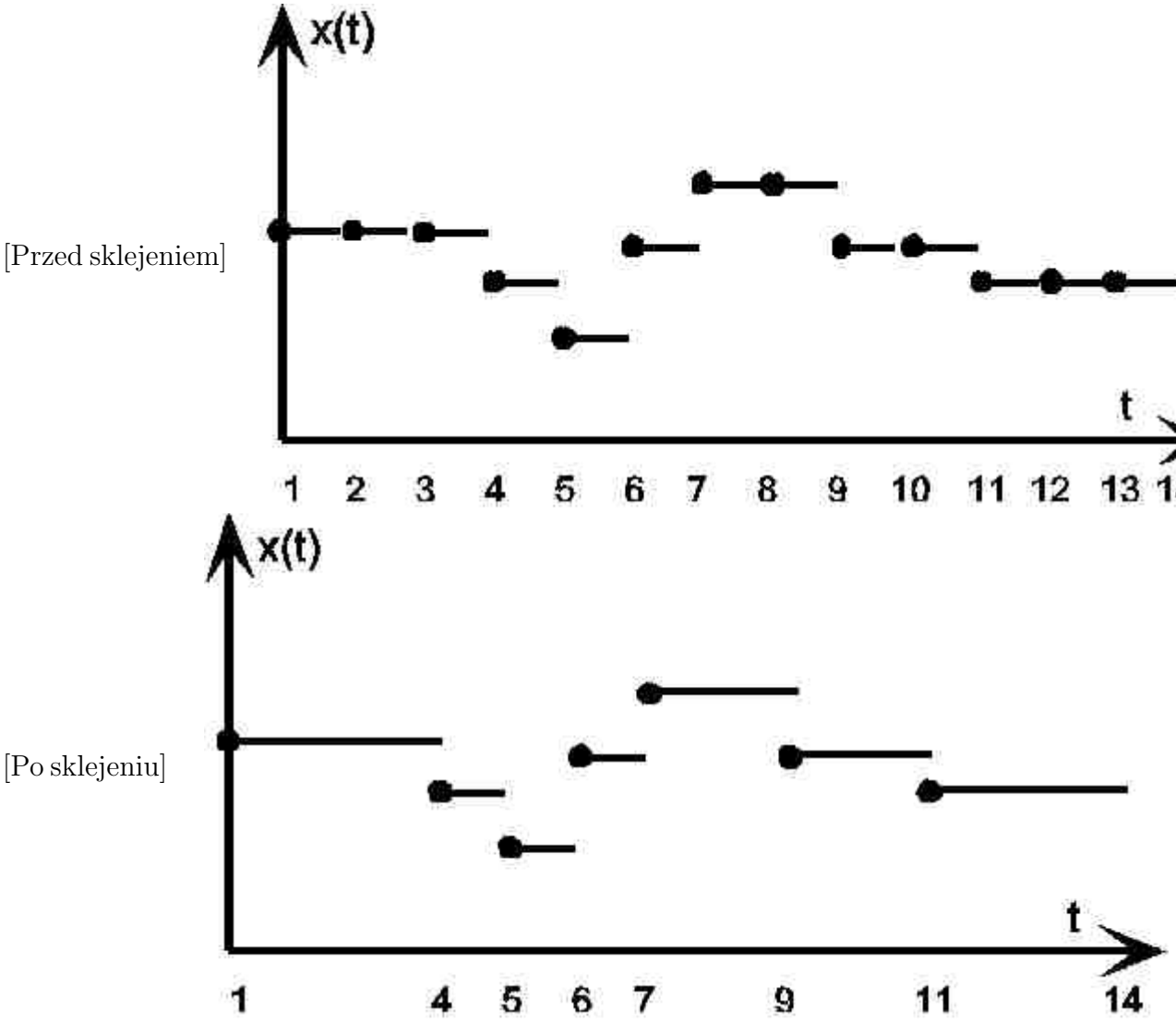
t_p - chwila określająca początek obserwacji wartości cechy,

t_k - chwila określająca koniec obserwacji wartości cechy.

Jeżeli wartości cechy w kolejnych chwilach nie zmieniają się, wówczas zbiór tych wartości chwilowych można zastąpić jedną wartością uwzględniającą łączny przedział czasowy ich obserwacji. W takim przypadku stosując zapis (2.26), t_p określa chwilę, w jakiej zaobserwowano rozpatrywaną wartość po raz pierwszy, natomiast t_k określa chwilę, w jakiej obserwowano ostatnią (tę) wartość. Ograniczanie liczności zbioru elementów wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych przez sklejanie można zapisać następująco:

$$\text{Jeżeli} \qquad x([t_{p,1}, t_{k,1})) = x([t_{p,2}, t_{k,2})) \qquad \text{to} \qquad x([t_{p,1}, t_{k,2})) \tag{2.27}$$

Przykład: Dany jest wykres wartości pewnej cechy (Rys. 2.3.2), którego wartości (x_i, $[t_{p,i}, t_{k,i}$) wynoszą odpowiednio: (5 1 2), (5 2 3), (5 3 4), (4 4 5), (3 5 6), (4,8 6 7), (6 7 8), (6 8 9), (5 9 10), (5 10 11), (4 11 12), (4 12 13), (4 13 14).



Rysunek 2.13: Przykład sklejania wartości cech

Wykres wartości cechy po ograniczeniu liczby elementów przez sklejanie zawiera następujące elementy (Rys. 2.3.2): (5 1 4), (4 4 5), (3 5 6), (4.8 6 7), (6 7 9), (5 9 11), (4 11 14). Na (Rys.2.3.2) oraz (Rys.2.3.2), czarna kropka oznacza wartość cechy x_i w chwili $t_{p,i}$, natomiast kreska reprezentuje odcinek czasu $[t_{p,i}, t_{k,i})$, w którym występowała wartość cechy x_i.

Przedstawione rozwiązanie zastosowano w opracowanym systemie diagnostycznym turbozespołów energetycznych [19], [31].

2.4 Podsumowanie

W rozdziale tym omówiono metody: ograniczania liczby cech, ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości oraz ograniczania liczby elementów wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych generowanych w czasie *makro*. W związku z liczną literaturą opisującą metody ograniczania liczby cech, w szczególności w diagnostycznych systemach doradczych oraz w związku z tym, iż w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn równolegle prowadzone są prace dotyczące rozwoju i zastosowania tych metod, problem ten jedynie został zasygnalizowany. Wygodnym sposobem ograniczenia liczby cech jest reprezentacja parametryczna, która została zastosowana w systemie DT200 [31]. Zastosowanie reprezentacji parametrycznej umożliwia dalsze ograniczenie liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości jak i ograniczenia liczby elementów wykresów wartości cech.

Metody ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów diagnostycznych można podzielić na metody wstępnego ograniczania oraz metody ograniczania końcowego (najczęściej będące oceną jakościową otrzymywaną w procesie klasyfikacji). W celu wstępnego ograniczania przyjęto, iż stosowana będzie zaproponowana metoda kwantowania z histerezą. Zalety kwantowania z histerezą omówiono w rozdziale 2.2.3, a przykładowe wyniki jej stosowania zamieszczono w rozdziale 4. Do ograniczania końcowego (oceny jakościowej) można stosować metody klasyfikacji reprezentacji przybliżonej, definiując rodziny liczb rozmytych, czy też skalowania. Jednakże stosowanie tych metod wymaga między innymi wyznaczenia wartości granicznych.

Do ograniczania liczby elementów wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych przyjęto metodę sklejania. Metoda ta może być stosowana dla wykresów wartości cech sygnałów ograniczonych przez kwantowanie z histerezą. Przyjęto również, że metoda ograniczania przez dobór częstości pobierania danych jest przede wszystkim zależna od możliwości sprzętowych, szybkości algorytmów wstępnego przetwarzania oraz wymagań systemu wnioskowania. Ważne jest, aby została zachowana ciągłość informacji o zjawiskach zachodzących w obserwowanym obiekcie.

Rozdział 3

Metody dopasowania dopuszczalnego ograniczenia wykresów wartości cech

Ograniczając liczbę elementów zbioru rozróżnianych wartości wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych, poprzez zastosowanie metody kwantowania z histerezą, dodatkowo usuwane są szumy na granicach pasm kwantowania. Stosując tę metodę, należy mieć na uwadze fakt, iż wprowadzane w sposób celowy zaokrąglenia wartości rzeczywistych mogą spowodować nieprawidłowości w procesie wnioskowania o stanie obiektu badań. W efekcie oceny jakościowej sygnałów diagnostycznych wynik może być inny niż wtedy, gdy stosowane będą wartości rzeczywiste. Ważne jest określenie dopuszczalnego stopnia ograniczenia wykresów wartości cech. Istotne znaczenie ma dobór kryteriów oraz ocen pozwalających na określenie dopuszczalnego ograniczania. W rozdziale tym opisano metody dopasowania dopuszczalnego ograniczenia liczby elementów zbiorów rozróżnianych wartości cech przez kwantowanie z histerezą.

3.1 Analiza zmienności

Ocenę ograniczonych wykresów wartości cech można przeprowadzić na podstawie ilościowej analizy zmienności, wyznaczając podstawowe charakterystyki określające [3], [54], [86], [88], [98], [89]:

- położenie,
- zakres rozproszenia wartości wykresu wokół wartości środkowej,

- symetrię rozkładu wartości wykresu ograniczonego.

Miary określające położenie, czyli rozmieszczenie wartości wykresu ograniczonego, znane są ogólnie pod nazwą *średnich*, do których zalicza się:

- średnią,
- średnią geometryczną,
- średnią harmoniczną,
- medianę,
- wartość modalną.

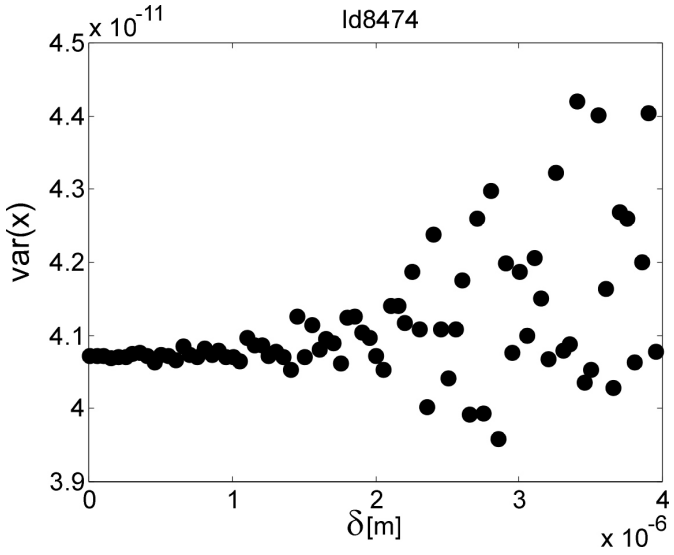
Natomiast do miar określających stopień rozproszenia (dyspersji) wartości wykresu ograniczonego zalicza się m.in.:

- odchylenie standardowe,
- odchylenie średnio-kwadratowe,
- odchylenie przeciętne,
- wariancję.

Trzecią grupę charakterystyk symetrii rozkładu stanowią:

- momenty centralne trzeciego i czwartego rzędu,
- miary skośności,
- kurtoza.

Przyjmując, że wykres wartości cechy charakteryzuje się określonymi statystykami, to po ograniczeniu liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości charakteryzuje się on nowymi statystykami. Ważne jest, aby stosowanie takiego ograniczenia nie powodowało istotnych zmian tych statystyk. Do wyznaczenia dopuszczalnego ograniczenia liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości można zastosować wyróżnione statystyki. Podstawą jest ocena wpływu zmiany tych miar w stosunku do kolejnych stopni ograniczenia (szerokości pasm kwantowania). Takie postępowanie jest właściwe tylko wówczas, gdy wartości rozpatrywanych statystyk stanowią podstawę do wnioskowania o stanie obserwowanego obiektu badań. W przeciwnym wypadku postępowanie takie jest nieuzasadnione zwłaszcza wtedy, gdy na podstawie danych wyznacza się cechę funkcyjną, np. widmo.



Rysunek 3.1: Przykład wpływu szerokości pasma kwantowania na wariancję wykresu wartości cechy id8474

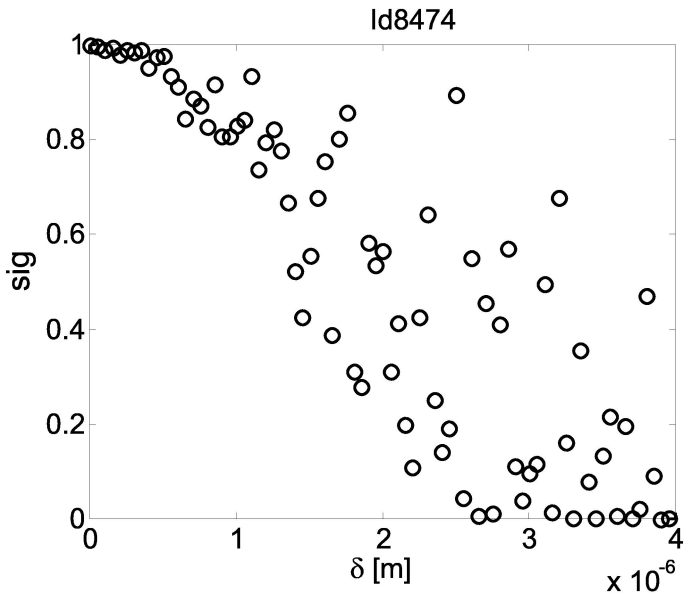
3.2 Testy statystyczne

Do określenia dopuszczalnego stopnia ograniczenia wykresów wartości cech liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości można zastosować metody analizy statystycznej. Przyjmuje się, że poszukiwane będzie dopasowanie ograniczonego wykresu wartości $\widehat{x}$ do rzeczywistego wykresu wartości x. Możliwe do zastosowania są testy średniej (test t-Studenta) lub wariancji (test χ^2, test Z) [3], [6], [48], [54].

Dla testu χ^2, badana hipoteza zerowa przyjmuje, że nie ma różnicy między rzeczywistym wykresem wartości a ograniczonym wykresem wartości.

$$\chi^2 = \sum_{t=1}^{n} \frac{(\widehat{x}(t) - x(t))^2}{x(t)} \tag{3.1}$$

Poziom, przy którym odrzuca się hipotezę zerową, jest poziomem istotności. Ograniczając wykresy wartości cech w zbiorze rozróżnianych wartości przez kwantowanie z histerezą, wartość poziomu istotności należy przyjąć możliwie dużą. Dla testu χ^2 proponuje się przyjęcie poziomu istotności $\alpha = 0,9$. Powodem przyjęcia tak wysokiej wartości poziomu istotności jest fakt, iż celem stosowania tego testu jest określenie dopuszczalnego *odchylenia* (niedopasowania) wykresu ograniczonego względem wykresu rzeczywistego. Oznacza to, że odchylenie na poziomie istotności mniejszym niż 0.9 jest rozumiane jako ograniczenie niedopuszczalne. Na rysunku 3.2 przedstawiono przykładowe wyniki testu χ^2 obrazujące wpływ szerokości pasma kwantowania z histerezą na wartość poziomu istotności.



Rysunek 3.2: Przykład wpływu szerokości pasma kwantowania z histerezą na poziom istotności testu χ^2

Do oceny utraty zgodności ograniczonego wykresu wartości względem rzeczywistego wykresu można również zastosować *Test z*. Postać statystyki z jest następująca [89]:

$$z = \frac{\widehat{x} - \mu_x}{\sigma_x} \tag{3.2}$$

gdzie:

μ_x - średnia dla wykresu rzeczywistego x,

σ_x - odchylenie standardowe dla wykresu rzeczywistego x,

Test ten umożliwia obserwację utraty zgodności ograniczonego wykresu wartości względem rzeczywistego wykresu w funkcji średniej i odchylenia standardowego wykresu rzeczywistego. Hipoteza zerowa zakłada, że ograniczony wykres wartości posiada zgodność pod względem średniej i odchylenia standardowego wyznaczonego dla wykresu rzeczywistego. Proponuje się przyjęcie poziomu istotności $\alpha = 0.9$.

Omówione testy statystyczne umożliwiają oszacowanie dopuszczalnego stopnia ograniczenia wykresów wartości, gdzie zakres zbioru wartości wykresu rzeczywistego jest również zbiorem wykresu ograniczonego. Jeżeli stosuje się metody jakościowej oceny ograniczonych wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych, to dopuszczalne ograniczenie można wyznaczyć z uwzględnieniem testu χ^2 dla danych zliczeniowych, o charakterze skokowym (identyfikatory klas). Postać statystyki χ^2 dla danych nieciągłych jest następująca [89]:

$$\chi^2 = \frac{(|a - r * b| - (r+1)/2)^2}{r * n} \tag{3.3}$$

gdzie:

a - liczba niepoprawnie sklasyfikowanych wartości,

b - liczba poprawnie sklasyfikowanych wartości,

r - stosunek dopuszczalnej liczby niesklasyfikowanych wartości do poprawnie sklasyfikowanych,

n - liczba klasyfikowanych wartości.

Procedura zastosowania opisanej statystyki χ^2 jest następująca:

- dla znanego klasyfikatora dokonać klasyfikacji rzeczywistych wartości wykresu x (przed ograniczeniem *on-line*) - uzyskany zostanie nowy wykres, którego kolejne wartości odpowiadają numerom klas, do jakich przyporządkowano wartości wykresu rzeczywistego,

- dla przyjętej szerokości pasma kwantowania δ przeprowadzić ograniczenie wykresu wartości x,

- stosując ten sam klasyfikator jak dla wykresu rzeczywistego, dokonać klasyfikacji wykresu wartości przybliżonych (po kwantowaniu) $\widehat{x}$ - uzyskany zostanie nowy wykres, którego kolejne wartości odpowiadają numerom klas, do jakich przyporządkowano wartości wykresu ograniczonego,

- na podstawie porównania nowych wykresów, których wartościami są identyfikatory klas, wyznaczyć wartości współczynników a oraz b,

- dla przyjętej liczby oczekiwanych błędnych klasyfikacji do przyjętych poprawnych klasyfikacji wyznaczyć wartość współczynnika r,

- wyznaczyć wartość statystyki χ^2.

3.3 Analiza korelacyjna

Inną metodą pozwalającą określić dopuszczalny stopień ograniczenia liczby elementów zboru rozróżnianych wartości cech sygnałów diagnostycznych jest badanie korelacji pomiędzy rzeczywistym wykresem wartości cechy a ograniczonym wykresem wartości tej cechy. Można wyróżnić dwa rodzaje zadań:

1. w wyniku ograniczenia wykresów wartości cech nadal dysponujemy wartościami, a w zbiorze tych wartości obowiązuje uporządkowanie,

2. w wyniku ograniczenia wykresów wartości cech otrzymywany jest nowy wykres, będący obrazem wartości cech (np. wartościami są numery klas).

W pierwszym przypadku możliwe jest zastosowanie korelacji do wyznaczania dopuszczalnego ograniczenia wykresów wartości. Natomiast w drugim przypadku badanie korelacji pomiędzy wykresem wejściowym a ograniczonym nie ma sensu. Dlatego w dalszej części propozycja zastosowania korelacji będzie dotyczyć zadania pierwszego.

Wyznaczany *współczynnik korelacji* jest miarą ilościową związku pomiędzy zmiennymi (w tym wypadku wykresami wartości cech). Wartości współczynnika korelacji dwóch zmiennych x, $\widehat{x}$, wyznaczane są na podstawie następującej zależności [88]:

$$r(x,\widehat{x}) = \frac{cov(x,\widehat{x})}{\sqrt{cov(x,x) * cov(\widehat{x},\widehat{x})}} \tag{3.4}$$

gdzie:

$cov(x)$ - funkcja kowariancji.

Wartość współczynnika korelacji zawiera się w przedziale $< -1, 1 >$. Jeżeli wartość wyznaczanego współczynnika korelacji wynosi 1 lub -1, oznacza to, że istnieje całkowite powiązanie zmiennych. Znak określa kierunek zmian porównywanych wartości cech. Gdy wartość współczynnika korelacji wynosi 0, oznacza to brak liniowych powiązań pomiędzy badanymi wartościami cech (zmiennymi).

Ważnym zadaniem jest ustalenie granicznej wartości współczynnika korelacji wykresu rzeczywistego względem ograniczonego. Jak podaje *Thomas* [88], przyjęcie powiązania pomiędzy cechami zależy od liczności zbiorów wartości tych cech. Wraz ze wzrostem liczby tych wartości maleje graniczna wartość współczynnika korelacji.

Tabela 3.1: Graniczne wartości współczynnika korelacji [88]

liczba danych	3	6	10	50	100
r	0,997	0,878	0,632	0,35	0,019

Jednakże w rozpatrywanym zadaniu nie poszukuje się symptomów powiązania pomiędzy wykresami, lecz szuka symptomów dopuszczalnego braku powiązania. Graniczna wartość współczynnika korelacji pomiędzy wykresami powinna obejmować dopuszczalną niezgodność pomiędzy nimi na znaczącym poziomie.

Do określenia dopuszczalnego poziomu stopnia ograniczenia wykresów wartości cech przez kwantowanie i kwantowanie z histerezą przy zastosowaniu korelacji wzajemnej wymaga się, aby zgromadzone dane obejmowały kilka cykli pracy obserwowanego obiektu i dużą liczność danych.

Przykład wpływu szerokości pasma kwantowania na wartość współczynnika korelacji pomiędzy wykresem rzeczywistym a wykresem ograniczonym został pokazany na rys. 3.3.

Skutkiem ograniczania wykresów wartości cech w zbiorze rozróżnianych wartości jest utrata informacji o względnych zmianach kolejnych wartości. Do określenia

dopuszczalnego stopnia ograniczenia przez obserwację korelacji pomiędzy wykresem rzeczywistym a ograniczonym można zastosować badanie korelacji pomiędzy wykresami zmian względnych (przyrostów), które wyznaczane są w następujący sposób:

$$\Delta x = x(t) - x(t-1), \qquad \text{dla t=2,..n} \tag{3.5}$$

$$\Delta \widehat{x} = \widehat{x}(t) - \widehat{x}(t-1), \qquad \text{dla t=2,...,n} \tag{3.6}$$

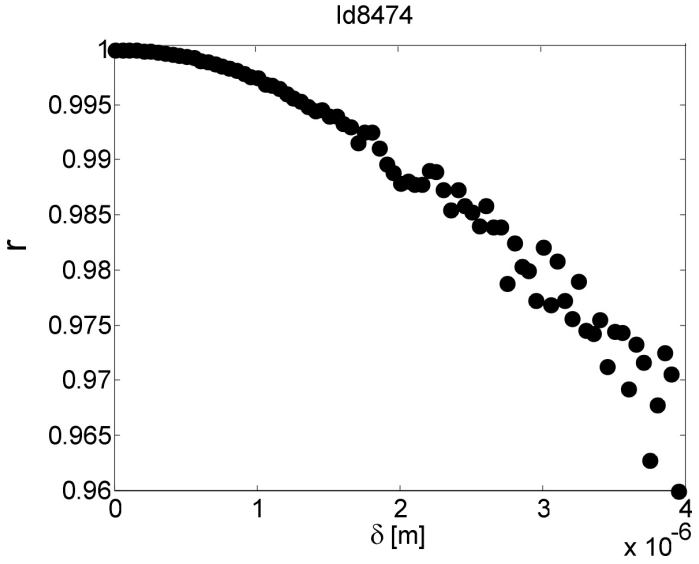
Postać funkcji korelacji dla wykresów zmian względnych (przyrostowych) jest następująca:

$$r(x, \widehat{x}) = \frac{cov(\Delta x, \Delta \widehat{x})}{\sqrt{cov(\Delta x, \Delta x) * cov(\Delta \widehat{x}, \Delta \widehat{x})}} \tag{3.7}$$

gdzie *cov* jest funkcją kowariancji.

3.4 Miary jakości

Przyjęta metoda ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów diagnostycznych wymaga przeprowadzenia oceny jakości nowych wykresów. W niniejszym rozdziale przedstawiono aspekty dotyczące jakościowej oceny dopuszczalnego stopnia ograniczenia wykresów wartości cech.



Rysunek 3.3: Przykład wpływu szerokości pasma kwantowania na wartości współczynnika korelacji $r(x, \widehat{x})$

3.4.1 Ocena wykresów różnicowych

Na skutek ograniczenia liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech, uzyskiwany jest nowy *zniekształcony* wykres. Jakość nowego wykresu wartości można oceniać na podstawie wykresu różnicowego (3.8):

$$\Delta = x - \widehat{x} \tag{3.8}$$

Zastosowanie zależności (3.8) możliwe jest wówczas, gdy wartości wykresu rzeczywistego x oraz wykresu ograniczonego $\widehat{x}$ są w postaci ilościowej i określone w tej samej skali wartości oraz w tych samych zbiorach wartości. Przypadek taki występuje, gdy wykres wartości cechy x zostanie ograniczony w dziedzinie rozróżnianych wartości poprzez np. kwantowanie czy kwantowanie z histerezą. Uzyskany wykres różnicowy jest wykresem *szumu kwantowania* i może być rozpatrywany jako wykres wartości nowej cechy będącej nośnikiem utraty dokładności. Do jakościowej oceny takich wykresów różnicowych można zastosować następujące obiektywne miary stopnia ograniczenia [83]:

Średnia różnica

$$SR = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(x(t) - \widehat{x}(t)) \tag{3.9}$$

Zawartość strukturalna

$$ZS = \sum_{t=1}^{n} x(t)^2 / \sum_{t=1}^{n} \widehat{x}(t)^2 \tag{3.10}$$

Znormalizowana korelacja skośna

$$ZKS = \sum_{t=1}^{n} (x(t) * \widehat{x}(t)) / \sum_{t=1}^{n} x(t)^2 \tag{3.11}$$

Jakość korelacji

$$JK = \sum_{t=1}^{n} (x(t) * \widehat{x}(t)) / \sum_{t=1}^{n} x(t) \tag{3.12}$$

Maksymalna różnica

$$MR = \max\{|x - \widehat{x}|\} \tag{3.13}$$

Odchylenie średniokwadratowe

$$OS = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} (x(t) - \widehat{x}(t))^2 \tag{3.14}$$

Znormalizowane odchylenie bezwzględne

$$ZOB = \sum_{t=1}^{n} |x(t) - \widehat{x}(t)| / \sum_{t=1}^{n} x(t) \tag{3.15}$$

Znormalizowane odchylenie średniokwadratowe

$$ZOS = \sum_{t=1}^{n} (x(t) - \widehat{x}(t))^2 / \sum_{t=1}^{n} x(t)^2 \tag{3.16}$$

Norma L_p (Minkowskiego)

$$L_p = \{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n} |x(t) - \widehat{x}(t)|^2\}, \qquad \text{p=1,2,3,...} \tag{3.17}$$

Stosunek sygnału do szumu

$$SNR = 10 \log_{10}(\sum_{t=1}^{n} x(t)^2 / \sum_{t=1}^{n} x(t) - \widehat{x}(t)^2) \tag{3.18}$$

gdzie:

$x(t)$ - wartość cechy x w chwili t przed ograniczeniem,

$\widehat{x}(t)$ - wartość cechy $\widehat{x}$ w chwili t, będąca przybliżeniem wartości cechy x w chwili t,

n - liczba wartości wykresu x oraz wykresu $\widehat{x}$.

3.4.2 Ocena błędu klasyfikacji

Wykresy wartości cech mogą być ograniczane w dziedzinie rozróżnianych wartości na podstawie oceny jakościowej. Ocena ta może być wynikiem procesu klasyfikacji w trybie *on-line*, bądź w trybie *off-line*. Dla uproszczenia można przyjąć, iż wynikiem takiej oceny jest identyfikator klasy reprezentowany w postaci wartości ilościowej. Jeżeli klasyfikacja prowadzona jest w trybie *on-line*, wówczas stopień błędu klasyfikacji bezpośrednio zależy od zbudowanego klasyfikatora. Metody budowy klasyfikatorów, jak również miary oceny błędu klasyfikacji, są opisywane w wielu publikacjach, między innymi: [14], [72], [66].

Jeżeli wykresy wartości cech są ograniczane w trybie *off-line* poprzez ocenę jakościową będącą wynikiem procesu klasyfikacji, wówczas ocenie tej podlegają wstępnie ograniczone wykresy wartości cech. Wstępne ograniczenie może być wynikiem kwantowania, bądź kwantowania z histerezą. W takim wypadku na proces klasyfikacji wpływa szum kwantowania oraz szum histerezy zmian. Dlatego, dobierając dopuszczalną szerokość pasma kwantowania dla cech, których wartości w dalszym etapie ograniczania podlegają procesowi klasyfikacji, należy przeprowadzić ocenę jakościową wpływu szerokości pasma kwantowania na wynik klasyfikacji. Wymaga się przeprowadzenia klasyfikacji dla wartości wykresu rzeczywistego

x oraz klasyfikacji dla wartości wykresu ograniczonego w procesie kwantowania z histerezą $\widehat{x}$, a następnie porównania wyników tych klasyfikacji. Jakościową miarę określającą błąd klasyfikacji można zapisać następująco:

$$QK = \frac{MK}{NK} \tag{3.19}$$

gdzie:

MK - liczba błędnie sklasyfikowanych wartości wykresu $\widehat{x}$ względem sklasyfikowanych wartości wykresu rzeczywistego x,

NK - liczba klasyfikowanych wartości wykresu rzeczywistego x oraz wykresu ograniczonego $\widehat{x}$.

Miara QK wskazuje na stosunek liczby błędnie sklasyfikowanych wartości cech po kwantowaniu względem sklasyfikowanych wartości przed kwantowaniem do liczby wszystkich klasyfikowanych wartości. Im wartość QK jest bliższa 1, tym wpływ szerokości pasma kwantowania na proces wnioskowania o stanie obiektu jest mniejszy.

3.4.3 Stopień ograniczenia wykresów wartości cech

W wyniku zastosowania metody ograniczenia liczby elementów w zbiorze rozróżnianych wartości poprzez kwantowanie z histerezą możliwe staje się sklejanie elementów wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych. W przypadku ograniczanych wykresów wartości cech można przeprowadzić jakościową ocenę stopnia redukcji liczby elementów wykresów wartości cech. Do tego celu można zastosować miarę określającą *procentowy stopień ograniczenia*, której postać jest następująca:

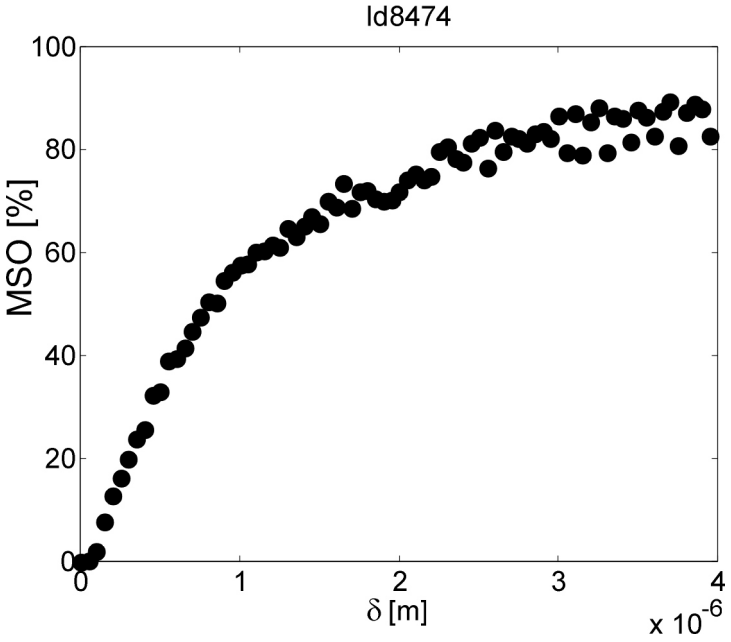
$$MSO = (1 - \frac{n}{m}) * 100\% \tag{3.20}$$

gdzie:

m - liczba wartości wykresu ograniczonego przed sklejaniem odcinków czasu,

n - liczba wartości wykresu ograniczonego po sklejeniu odcinków czasu.

Przykład wpływu szerokości pasma kwantowania δ na miarę MSO został przedstawiony na rysunku 3.4.



Rysunek 3.4: Przykład wpływu szerokości pasma kwantowania na stopień ograniczenia wykresu wartości cechy id8474

3.5 Proponowany algorytm

Przedstawione metody dopasowania dopuszczalnego ograniczenia wykresów wartości cech, jak również miary oceny jakości ograniczonych wykresów, proponuje się zastosować według ustalonego postępowania. W celu ograniczania w trybie *online* wykresów wartości cech poprzez kwantowanie bądź kwantowanie z histerezą należy:

1. wyznaczyć podstawowe statystyki wykresu rzeczywistego x,
2. dla przyjętej wartości szerokości pasma kwantowania δ wyznaczyć wykres ograniczony $\widehat{x}$ (na podstawie wykresu rzeczywistego),
3. wyznaczyć następujące miary określające odchylenie wykresu ograniczonego od wykresu rzeczywistego:
   - współczynnik korelacji dla wykresów wartości i/lub współczynnik korelacji dla wykresów wartości przyrostów względnych,
   - statystykę z oraz *test* z na przyjętym poziomie istotności,
   - statystykę χ^2 oraz *test* χ^2 na przyjętym poziomie istotności,
   - dla znanych klasyfikatorów wyznaczyć wykresy wartości będących wynikami klasyfikacji wykresu rzeczywistego oraz wykresu ograniczonego,

na podstawie których należy wyznaczyć stosunek błędnych klasyfikacji do wszystkich klasyfikowanych elementów,

- wyznaczyć jakościowe miary ograniczenia oraz miary streszczenia.

4. na podstawie wyznaczonych miar przyjąć, bądź odrzucić dopuszczalne ograniczenie wykresu wartości,

5. jeżeli przyjęto dopuszczalne ograniczenie, wówczas należy przyjąć większe ograniczenie i przejść do punktu 2, w przeciwnym wypadku należy przyjąć wartość dopuszczalnego ograniczenia uzyskaną w poprzednim kroku iteracji.

Rozdział 4

Przykłady zastosowań proponowanych metod

W rozdziale tym opisano przykłady zastosowań zaproponowanych metod ograniczania wykresów wartości cech jak również metod dopasowania dopuszczalnego stopnia ich ograniczenia. W przykładach wykorzystano dane z obiektu rzeczywistego. Celem jest pokazanie przydatności proponowanych metod ograniczania wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych, metod wyznaczania dopuszczalnego ograniczania wykresów wartości, a także miar oceny jakości wykresów ograniczonych w dynamicznych systemach doradczych stosowanych do ciągłego monitorowania stanu maszyn.

4.1 Plan zastosowania proponowanych metod

Zastosowanie metod ograniczania wykresów wartości cech możliwe jest wówczas, kiedy zostanie określona metoda:

- ograniczania liczby cech, ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów oraz ograniczania liczby elementów wykresów wartości cech,
- dopasowania dopuszczalnego stopnia ograniczenia,
- oceny ilościowej i jakościowej wykresu ograniczonego względem wykresu rzeczywistego.

Po realizacji powyższych czynności można wyznaczyć stopień redukcji ograniczonych wykresów wartości cech.

4.2 Charakterystyka zadania

W wyniku realizacji projektu badawczego PBZ-038-06[1] opracowano pod kierunkiem W. Cholewy oraz J. Kicińskiego system diagnostyki turbozespołów energetycznych o mocy 200MW o nazwie DT200-1 [31]. System ten składa się z szeregu autonomicznych, współpracujących ze sobą modułów. Jest to system tak skonstruowany, aby istniała możliwość jego późniejszych modyfikacji, jak również rozszerzania jego zakresu na kolejne bloki energetyczne. Z uwagi na dużą złożoność opracowanego systemu opisane zostaną tylko główne jego elementy.

Na podstawie sformułowanych założeń [19], a następnie ich modyfikacji spowodowanej doświadczeniem zdobytym w trakcie realizacji projektu, jak i szybkim postępem techniki komputerowej, wykonano system, który zawiera następujące elementy [31]:

- sieciowy układ akwizycji sygnałów DT2B100, którego zadaniem jest wstępne przetwarzanie sygnałów dynamicznych odbieranych z czujników drgań względnych oraz z czujników drgań bezwzględnych umieszczonych w określonych punktach pomiarowych turbiny [42],
- bazę danych, służącą do gromadzenia i archiwizacji wartości cech sygnałów diagnostycznych [26],
- aplikacje (programów komputerowych) systemowe służące do:
  - przenoszenia cech sygnałów z układów akwizycji do baz(y) danych poprzez sieć komputerową [85], [38],
  - obsługi systemu doradczego,
  - pielęgnowania bazy danych [26],
  - konfiguracji systemu diagnostycznego,
- aplikację stacji operatorskiej umożliwiającą bezpośrednią obserwację zachodzących zjawisk oraz obserwację stanu turbiny na podstawie danych gromadzonych w bazie danych, która zawiera:

[1]Projekt badawczy KBN, PBZ-038-06 p.t. *Opracowanie nowoczesnych systemów diagnostycznych turbozespołów krajowych bloków energetycznych dużej mocy* był realizowany w okresie od 1995 do 1997 przez następujące ośrodki: Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku; Katedrę Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej w Gliwicach; Instytut Maszyn Cieplnych Politechnki Częstochowskiej; Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej; Instytut Mechaniki Stosowanej Politechniki Poznańskiej; Instytut Energetyki w Warszawie oraz firmę EnergoControl z Krakowa

  - moduł nadzoru drgań umożliwiający prowadzenie kontroli wszystkich podstawowych informacji prezentowanych jednocześnie dla całego turbozespołu,
  - moduł oceny stadium rozwoju uszkodzenia elementu maszyny za pomocą analizy trendów wraz z procedurami prognostycznymi,
  - moduł nadzoru parametrów procesowych pozwalających na obserwację w sposób ciągły stanów cieplno-wytrzymałościowych głównych elementów turbiny,
  - moduł umożliwiający nadzór wytężeniowy (nadzór naprężeń i temperatur elementów maszyny jak również gradientów tych parametrów),

- graniczne poziomy drgań,
- bazę wiedzy umożliwiającą wnioskowanie przy dynamicznie zmieniającej się zawartości bazy danych (zawierającej wyniki obserwacji i pomiarów),
- dynamiczny system doradczy,
- inne.

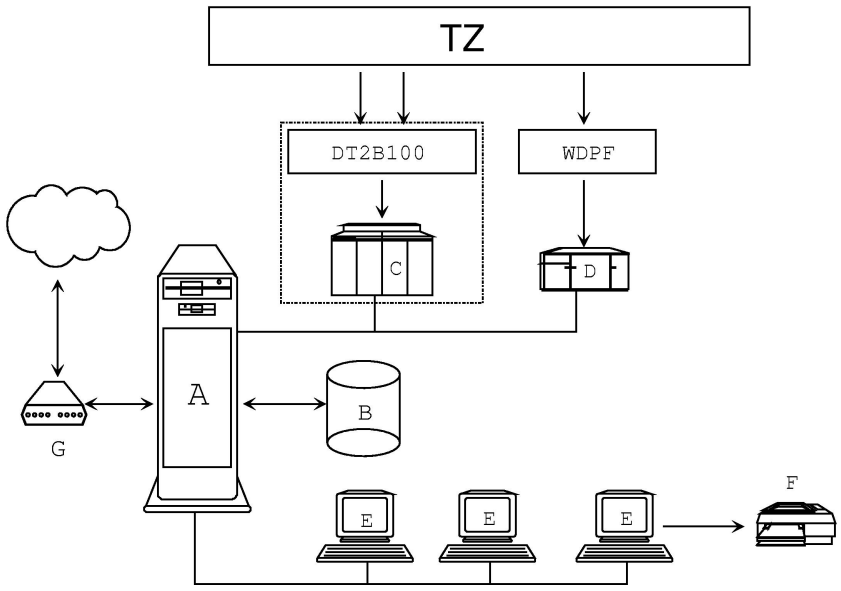
Centralnym elementem systemu DT-200 jest relacyjna baza danych, w której gromadzone są wartości cech sygnałów diagnostycznych. W trakcie opracowywania omawianej relacyjnej bazy danych uwzględniono potrzebę gromadzenia ograniczonych wartości cech sygnałów diagnostycznych.

Podczas realizacji tego systemu autor rozprawy opracował fragment oprogramowania systemowego, służącego do przenoszenia wartości cech sygnałów diagnostycznych z układów akwizycji sygnałów drganiowych DT2B100[2] (oprogramowanie pod nazwą DT3D220 [38]) oraz z układów akwizycji sygnałów procesowych WDPF[3] (oprogramowanie pod nazwą DT3D219 [4][85]) do systemu relacyjnej bazy danych DT4D111 [26]. Ponadto, zadaniem tych aplikacji jest bieżące ograniczanie gromadzonych wykresów wartości punktowych i funkcyjnych cech przy pomocy metod opisanych w rozprawie. Cechą charakterystyczną układu akwizycji DT2B100 jest to, że zakres realizowanych zadań może być zmieniany dynamicznie, przez co możliwe jest dopasowanie tych zadań do aktualnych warunków działania turbozespołu i jego stanu technicznego.

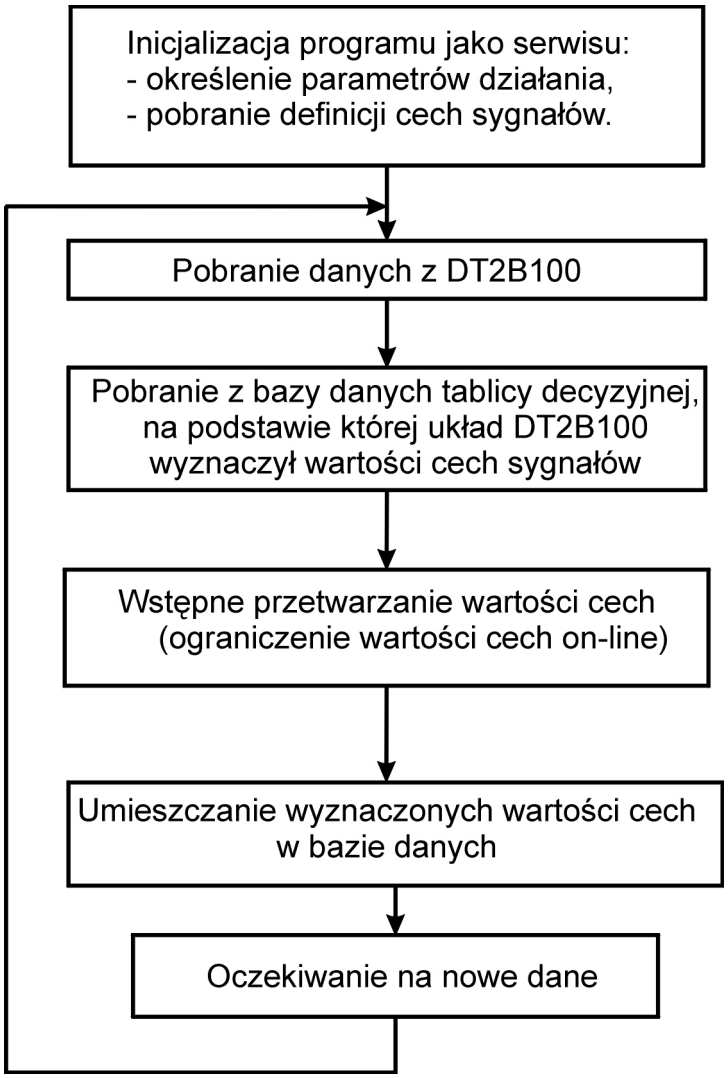
[2]wykonany przez firmę EnergoControl z Krakowa na podstawie założeń projektowych opracowanych przez W.Cholewę (Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej)

[3]Westinghouse Distributed Processing Family

[4]autor rozprawy jest współautorem oprogramowania DT3D219



Rysunek 4.1: Struktura systemu DT-200: *(A) - serwer systemu, (B) - bazy danych, (C) - sieciowy układ akwizycji sygnałów, (D) - układ łączący z systemem WDPF, (E) - stanowiska diagnostów i operatora systemu, (F) - urządzenia pomocnicze, (G) - modem umożliwiający zdalny dostęp do systemu* [19]



Rysunek 4.2: Schemat działania programu DT3D220

Główne założenia dotyczące aplikacji DT3D219 i DT3D220 były następujące:

- asynchroniczny sieciowy dostęp do danych udostępnianych przez układy akwizycji sygnałów,
- reagowanie na dynamiczne zmiany realizowanych zadań przez układy akwizycji (dynamicznie zmieniający się zbiór cech sygnałów),
- ograniczanie liczby cech (cech wielowymiarowych), poprzez zastosowanie reprezentacji parametrycznej,
- ograniczanie liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów diagnostycznych za pomocą kwantowania z histerezą,

- ograniczanie liczby elementów wykresów wartości cech sygnałów przy zastosowaniu metody sklejania,
- umieszczanie w relacyjnych bazach danych dokładnych i ograniczonych (przybliżonych) wartości cech sygnałów,
- działanie w imieniu systemu operacyjnego serwera DT200 (w postaci serwisu),
- krótki czas realizacji zadań (około kilku do kilkunastu sekund, w zależności od liczności zbioru wartości cech),
- umożliwienie administratorowi systemu DT200 zdalnego zatrzymania, aktualizacji oprogramowania (o ile zajdzie taka potrzeba) i uruchomienia aplikacji,
- wysyłanie do odpowiednich plików, komunikatów o aktualnym stanie pracy oprogramowania.

Na podstawie tych założeń opracowano oprogramowanie w języku programowania C++ [68], [67]. Testowanie oprogramowania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych za pomocą odpowiedniego oprogramowania symulującego sieciowy układ akwizycji. Opracowany system monitorowania stanu turbiny został zainstalowany w Elektrowni Kozienice S.A. Obiektem badań jest turbina nr 7. Wszystkie dane służące do weryfikacji opracowanych metod pochodzą z obserwacji tej turbiny. Z uwagi na dużą różnorodność cech dostarczanych przez układy akwizycji oraz ich liczność, w dalszej części tego rozdziału przedstawiono tylko przykłady weryfikacji metod ograniczania wybranych wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych.

4.3 Ograniczanie liczby rozpatrywanych cech

Dla potrzeb diagnostycznych systemów doradczych, do ograniczania liczby rozpatrywanych cech przyjęto reprezentację parametryczną. Metodę tę zastosowano do ograniczania widm amplitudowych wyznaczanych na podstawie przebiegu czasowego przemieszczeń drgań bezwzględnych pokryw łożysk. W systemie DT200-1 przyjęto, że takie widmo amplitudowe reprezentowane jest przez osiem składowych harmonicznych i 3 subharmoniczne. Uzyskana krotka jest rozpatrywana jako

punkt w przestrzeni o wymiarach określonych przez wyznaczone składowe [31]:

$$< f_n, A(1f_n), A(1/3f_n), A(1/2f_n), A(3/2f_n), A(2f_n), ..., A(8f_n), [t_p, t_k) > \quad (4.1)$$

gdzie:

f_n - częstotliwość wirowania wału,

$A(Xf_n)$ - amplitudy składowych harmonicznych częstości wirowania wału,

t_p - określa chwilę, w której zaobserwowano widmo,

t_k - określa chwilę, do której parametry zaobserwowanego widma nie uległy zmianie.

Zapis (4.1), można rozdzielić, przez co uzyskuje się odrębną dla każdej składowej krotkę w postaci:

$$\begin{bmatrix} < f_n, A(1f_n), t_{p,1f_n}, t_{k,1f_n} > \\ < f_n, A(1/3f_n), t_{p,1/3f_n}, t_{k,1/3f_n} > \\ < f_n, A(1/2f_n), t_{p,1/2f_n}, t_{k,1/2f_n} > \\ < f_n, A(2/3f_n), t_{p,2/3f_n}, t_{k,2/3f_n} > \\ < f_n, A(2f_n), t_{p,2f_n}, t_{k,2f_n} > \\ ... \\ < f_n, A(8f_n), t_{p,8f_n}, t_{k,8f_n} > \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Rozdzielenie punktowej wielowymiarowej cechy na zbiór cech punktowych jednowymiarowych powoduje, iż łatwiejsze staje się indywidualne dla każdej cechy dopasowanie pasm kwantowania, jak też ograniczanie. Ponadto mała dynamika zmian wartości dla niektórych składowych (szczególnie $A(4f_n)$ do $A(8f_n)$) powoduje, iż w wyniku sklejania elementów wykresów wartości tych cech w kolejnych chwilach uzyska się bardziej wymierne korzyści niż gdyby wszystkie cechy uwzględniać razem. W ten sposób otrzymano zbiór cech punktowych, które mogą być indywidualnie ograniczane przez kwantowanie z histerezą i sklejanie.

W przypadku rejestrowania widma reprezentowanego za pomocą krotki (4.1) przyjęto że $t_p = t_k$, gdyż w praktyce nie istnieją dwa takie same co do wartości, występujące po sobie widma. Jednakże, jeżeli każda wartość cechy należąca do tej krotki zostanie ograniczona w zbiorze wartości poprzez zaokrąglenie do odpowiedniej klasy, przez kwantowanie z histerezą, to taka sytuacja może mieć miejsce. Wówczas możliwe jest sklejanie sąsiednich widm reprezentowanych przez krotkę i modyfikowanie przy tym odcineka $[t_p, t_k)$.

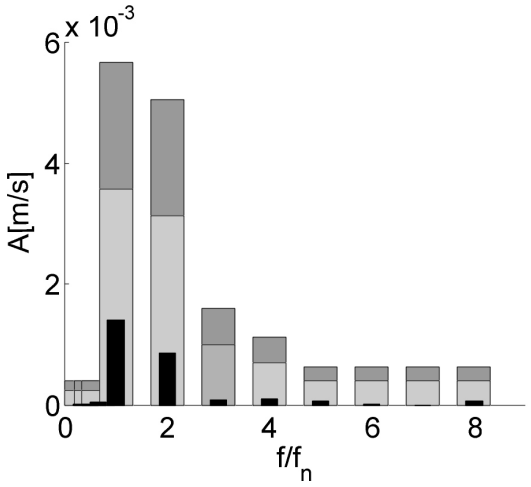
Przedstawione rozwiązanie polegające na reprezentacji parametrycznej widma jest często wystarczające, jednakże operatorowi systemu potrzebna jest również sygnalizacja wizualna (przybliżona), określająca klasę stanu, jaką reprezentuje widmo. W tym celu stosowane jest rozwiązanie polegające na porównaniu kolejnych wartości cech (parametrów) widma z wartościami granicznymi. Wartości te są wyznaczane w sposób indywidualny, najczęściej na podstawie norm, zaleceń producenta, a także na podstawie przeprowadzonego eksperymentu biernego [50].

W wyniku przeprowadzonych wieloletnich badań w IMC Politechniki Częstochowskiej oraz w Instytucie Energetyki [50], [77], [78] opracowano wartości graniczne dla turbiny K215. Dla przykładu w (Tab.4.1) przedstawiono wartości graniczne składowych harmonicznych i subharmonicznych widma wyznaczonego na podstawie przebiegu czasowego dla prędkości drgań bezwzględnych dla punktu pomiarowego nr 6 w kierunku poziomym (na podstawie materiałów dostarczonych przez IMC Politechniki Częstochowskiej):

Tabela 4.1: Wartości graniczne amplitud składowych harmonicznych i subharmonicznych drgań bezwzględnych w punkcie pomiarowym nr 6 w kierunku poziomym

nazwa cechy	Ostrzeżenie $*10^{-3}$[m/s]	Alarm $*10^{-3}$[m/s]
$A(1/3f_n)$	0,25	0,4
$A(1/2f_n)$	0,25	0,4
$A(2/3f_n)$	0,25	0,4
$A(1f_n)$	3,58	5,67
$A(2f_n)$	3,13	5,05
$A(3f_n)$	1,01	1,6
$A(4f_n)$	0,71	1,12
$A(5f_n)$	0,4	0,64
$A(6f_n)$	0,4	0,64
$A(7f_n)$	0,4	0,64
$A(8f_n)$	0,4	0,64

Przykładowe dyskretne widmo amplitudowe prędkości drgań bezwzględnych pokryw łożyska nr 6 zmierzone w kierunku poziomym wraz z wartościami granicznymi - *Ostrzeżenie* oraz *Alarm* przedstawiono na rysunku 4.3. Zmierzone wartości są przedstawione za pomocą wąskich słupków, natomiast wartości graniczne za pomocą szerszych słupków.



Rysunek 4.3: Przykładowe widmo dyskretne wraz z wartościami granicznymi

4.4 Ograniczanie liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech

Ograniczając liczbę cech poprzez zastosowanie reprezentacji parametrycznej, można też ograniczać liczbę elementów zbioru rozróżnianych wartości oraz liczbę elementów wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych. Otrzymane wielowymiarowe cechy punktowe (o mniejszej liczbie wymiarów w stosunku do liczby cech pierwotnych) można ograniczać indywidualnie względem każdego parametru. Powoduje to, iż w dalszej części pracy, do ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości w trybie *on-line* przyjęto metodę kwantowania z histerezą. W celu porównania możliwości tej metody z metodą kwantowania, przedstawiono wyniki stosowania obu tych metod [41].

Aby zobrazować problem związany z gromadzeniem otrzymywanych zbiorów danych, należy podkreślić, iż liczba cech jednocześnie obserwowanych sięga dwóch tysięcy. Wartości analizowanych cech pochodzą z układu monitorowania turbozespołu energetycznego nr 7 w Elektrowni Kozienice S.A. i obejmują około 1300 pomiarów dokonanych w odstępach 3 - minutowych. Stwierdzono, że otrzymane wykresy wartości cech nie zawierają trendów.

Dla zgromadzonych zbiorów wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych:

- przeprowadzono optymalizację szerokości pasma kwantowania i kwantowania z histerezą,
- wyznaczono stopień redukcji ograniczonych wykresów wartości cech,

- zweryfikowano uzyskane wyniki.

Przyjęto, iż ograniczenie liczby elementów wykresu wartości cech sygnałów poprzez dobór częstości pobierania danych polega na ustaleniu największej częstości, jaka jest możliwa do zrealizowania przez system akwizycji i przetwarzania, a także przez pozostałe elementy systemu diagnostycznego odpowiedzialne za sporządzanie i dynamiczne ograniczanie wykresów wartości cech.

Optymalizacja szerokości pasma kwantowania z histerezą dotyczy obserwacji wpływu tej szerokości pasma na:

- podstawowe charakterystyki określające: położenie (średnia, mediana), stopień rozproszenia (odchylenie standardowe, wariancja) oraz symetrię rozkładu (momenty centralne trzeciego i czwartego rzędu, skośność, kurtoza) dla ograniczonego wykresu wartości;

- wyniki testu χ^2 dla wykresu ograniczonego względem wykresu rzeczywistego;

- współczynnik korelacji wzajemnej wykresu ograniczonego względem wykresu rzeczywistego $r(x, \widehat{x})$.

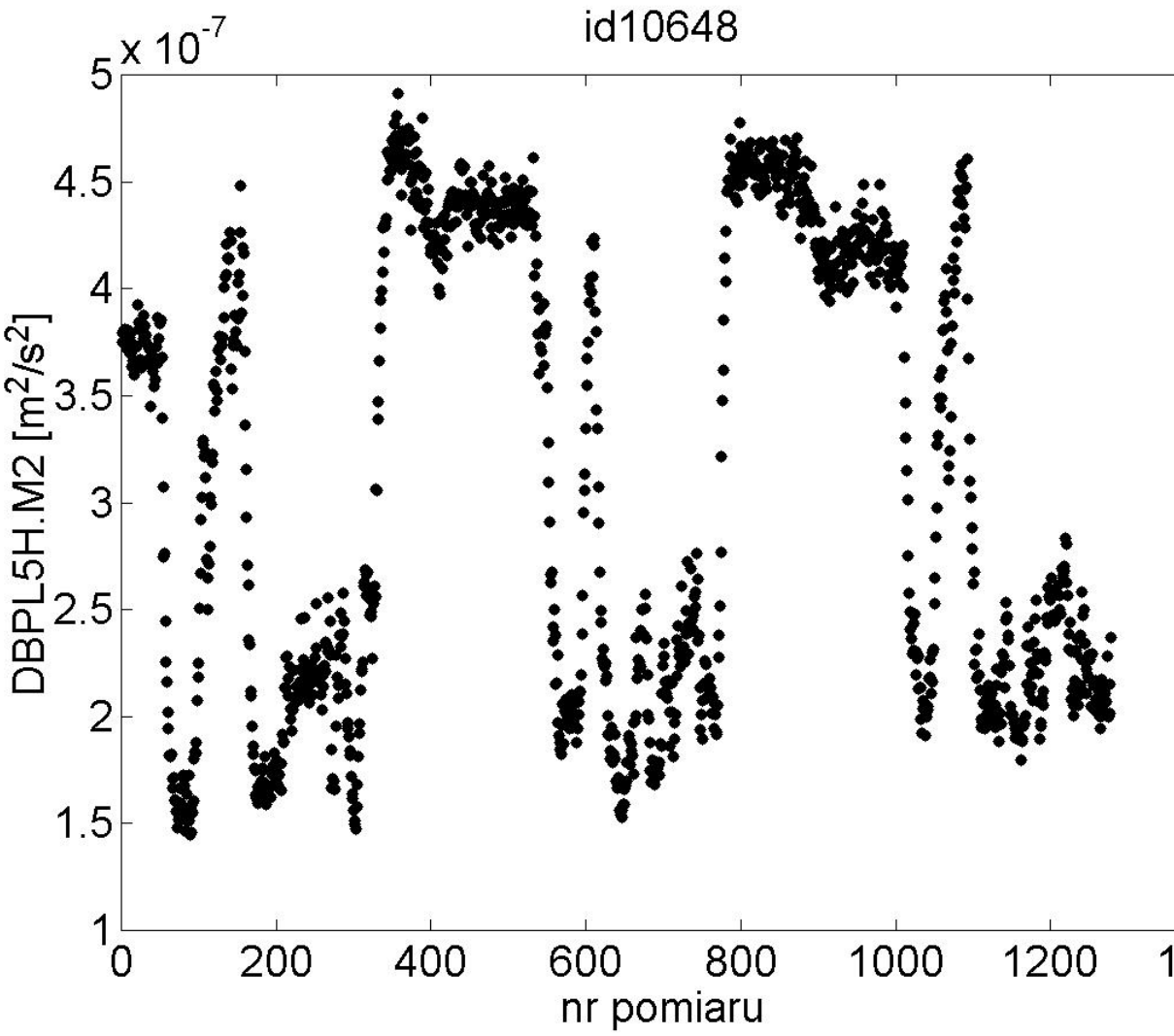
Przeprowadzając optymalizację szerokości pasma kwantowania z histerezą za pomocą testu χ^2, przyjęto, iż dopuszczalny poziom istotności może zawierać się w przedziale $\alpha = [1; 0, 9]$

Ponadto dokonano obserwacji wpływu szerokości pasma kwantowania δ na procentowy stopień ograniczenia (wg 3.20) wykresów wartości cech, których elementy zostały poddane sklejaniu.

4.4.1 Przykład optymalizacji szerokości pasma kwantowania

Optymalizację szerokości pasma kwantowania przeprowadzono na przykładzie (Rys. 4.4) wykresu wartości momentu centralnego drugiego rzędu dla prędkości drgań bezwzględnych zmierzonych na obudowie łożyska nr 5 w kierunku poziomym (w skrócie DBPL5H.M2), turbiny TG7 zainstalowanej w Elektrowni Kozienice S.A (oznaczony jako *id10648* wg. [26]).
Optymalizacja szerokości pasma kwantowania obejmuje:

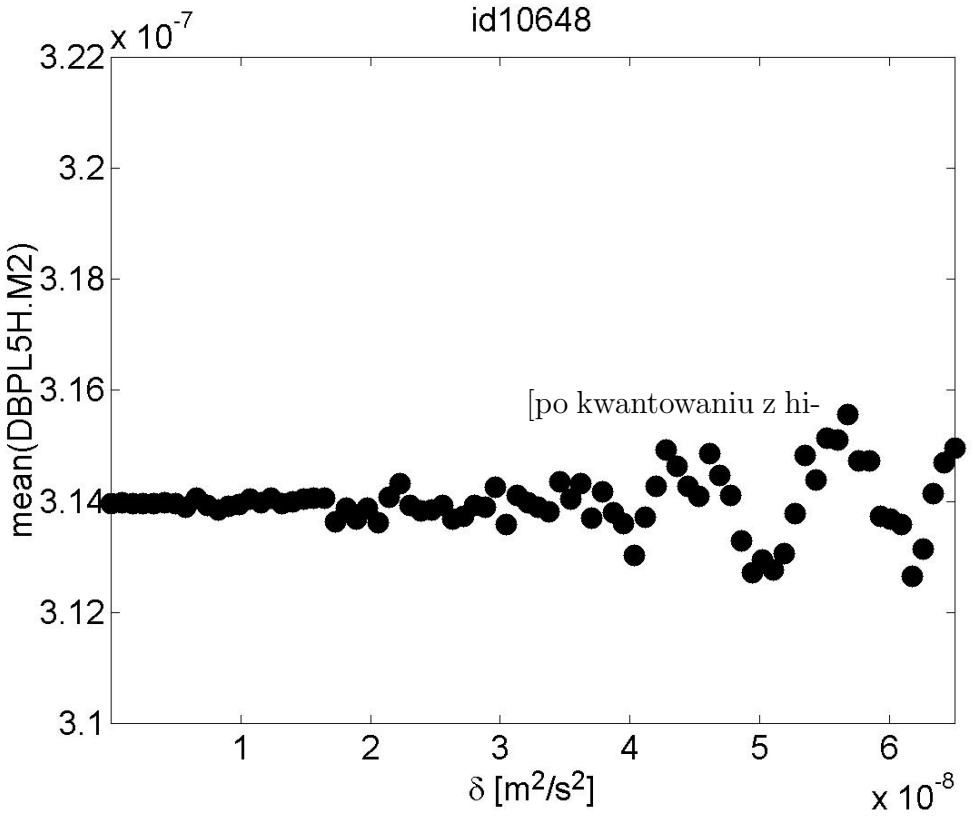
- analizę zmienności (Rys. 4.5 do Rys. 4.12),



Rysunek 4.4: Wykres wartości momentu centralnego drugiego rzędu dla prędkości drgań bezwzględnych pokrywy łożyska nr 5 w kierunku poziomym (DBPL5H.M2) turbiny parowej 200MW

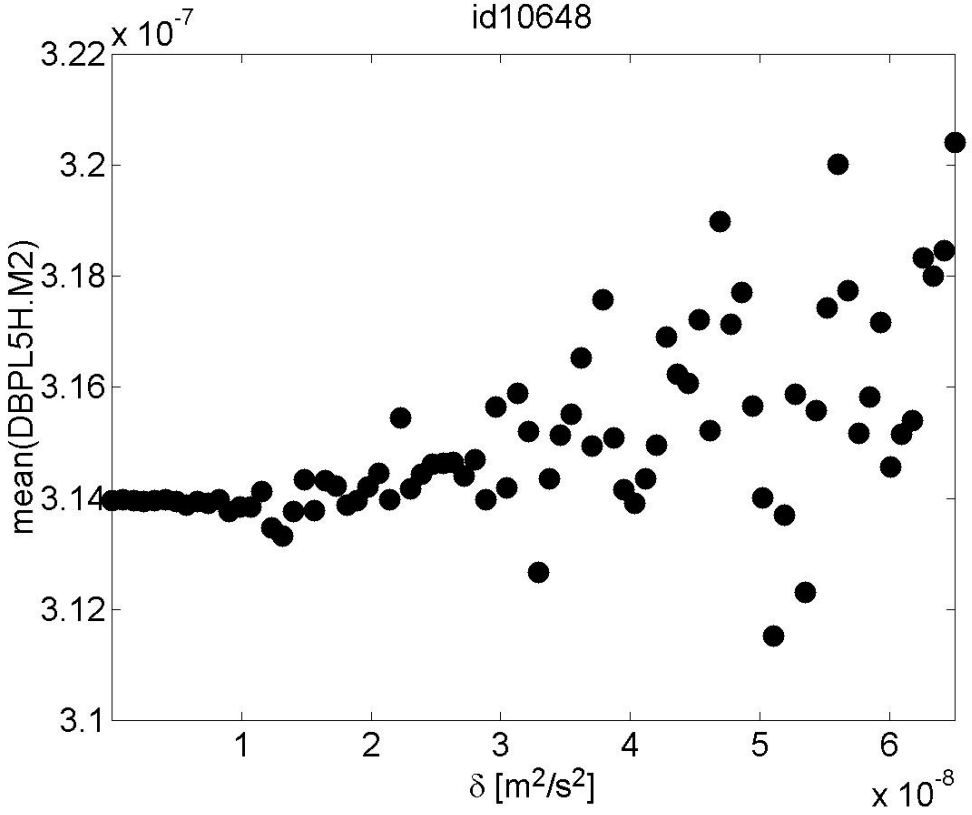
- test korelacji wzajemnej wykresu ograniczonego względem wykresu dokładnego (Rys.4.13),
- test χ^2 (Rys. 4.14),
- ocenę stopnia redukcji ograniczonych wykresów wartości cech sygnałów (Rys. 4.15).

[po kwantowaniu]



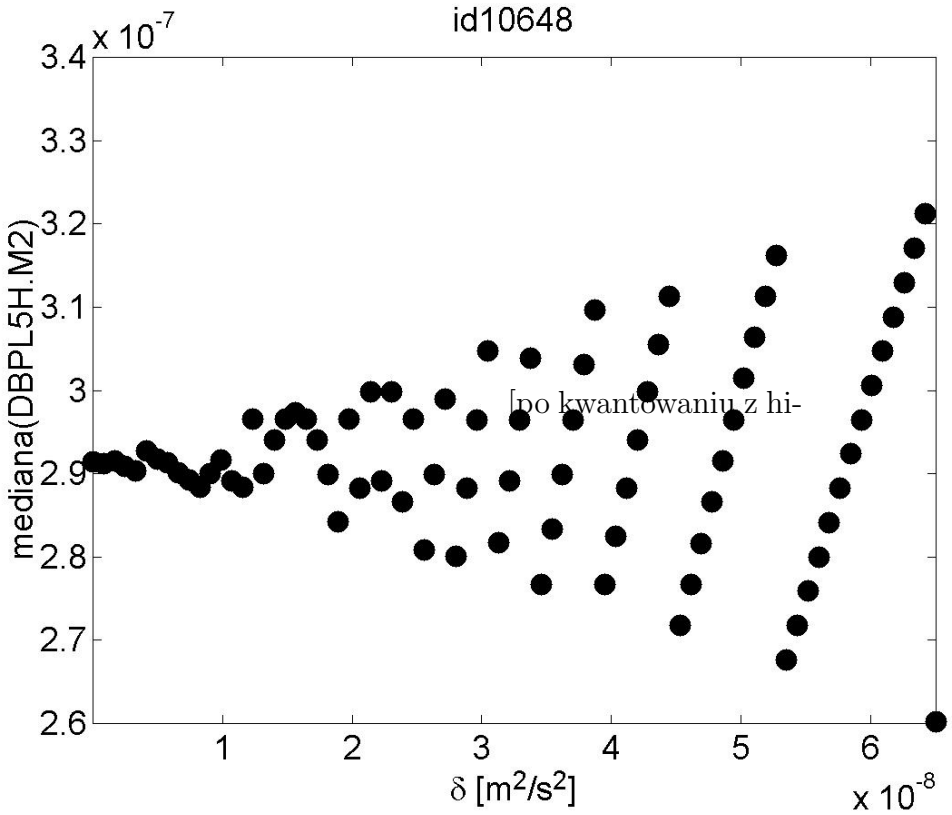
[po kwantowaniu z hi-

sterezą]



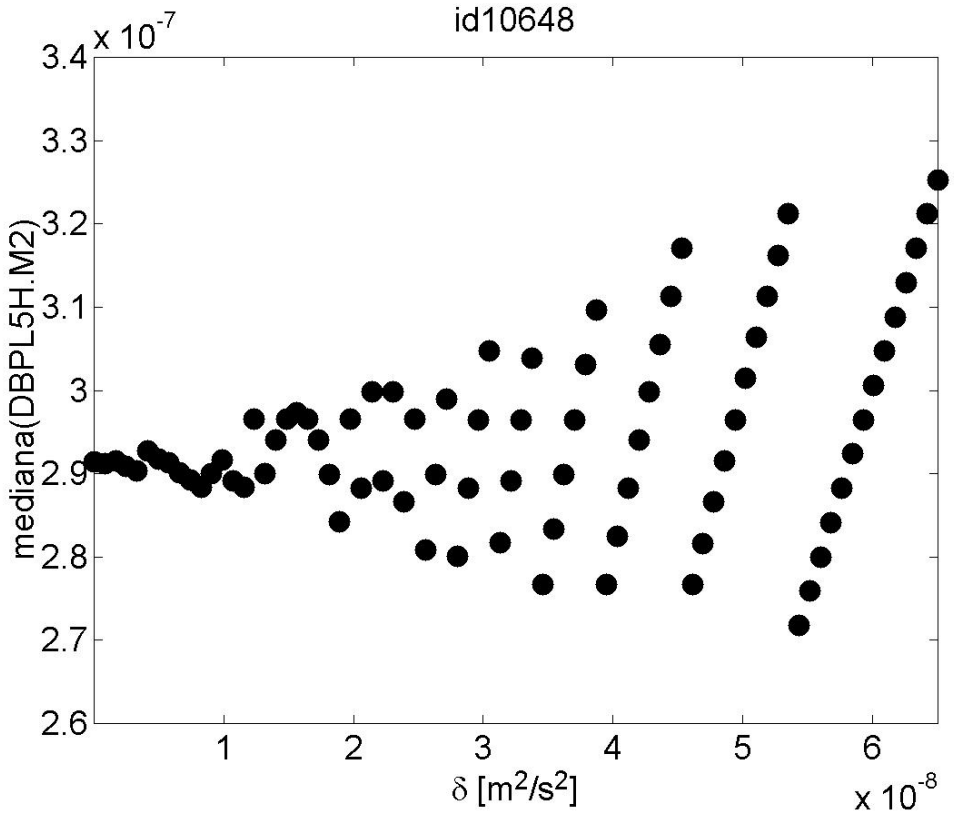
Rysunek 4.5: Wpływ szerokości pasma kwantowania na *średnią* dla DBPL5H.M2

[po kwantowaniu]

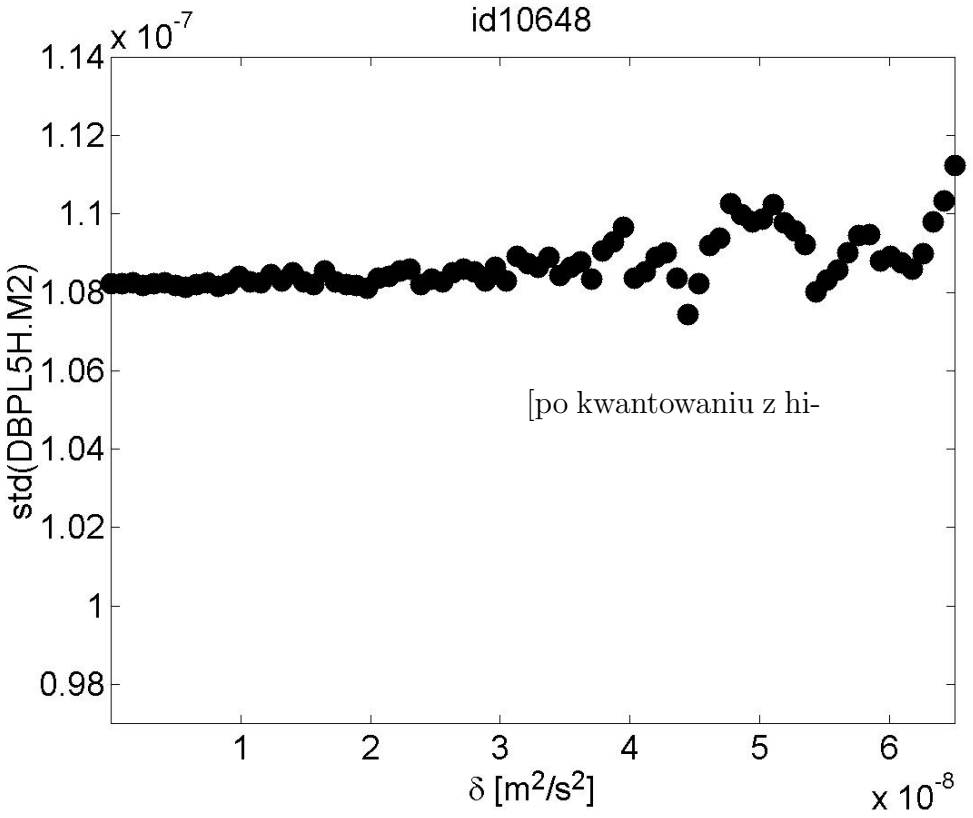


[po kwantowaniu z hi-

sterezą]

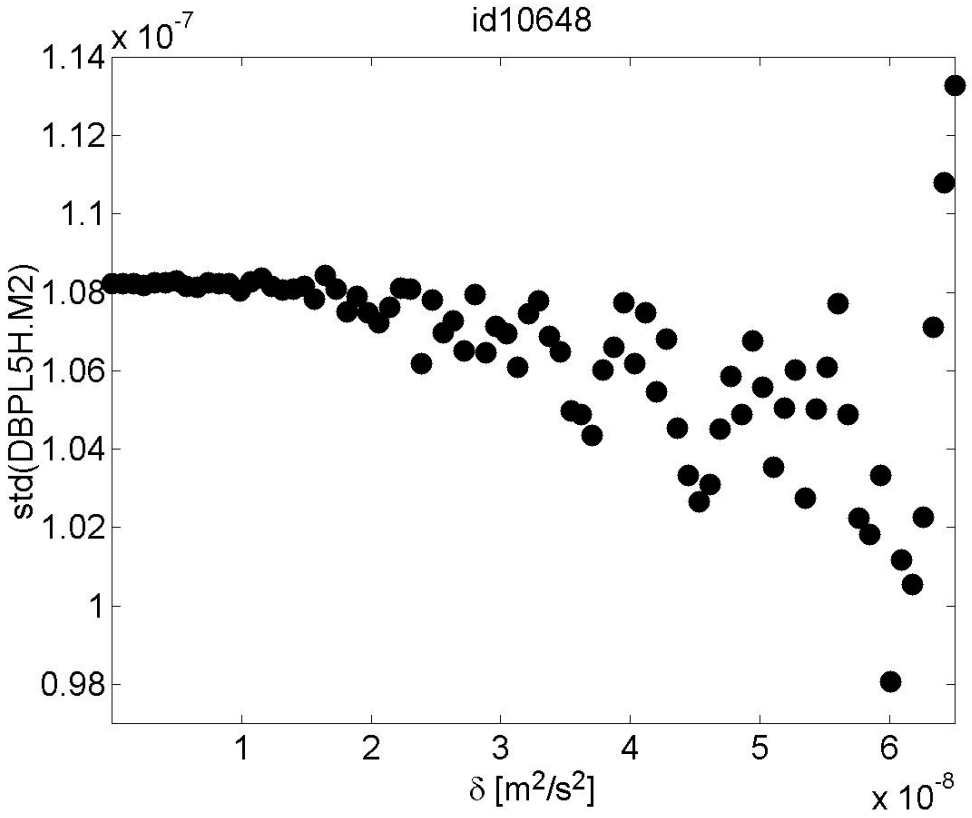


Rysunek 4.6: Wpływ szerokości pasma kwantowania na *medianę* dla DBPL5H.M2



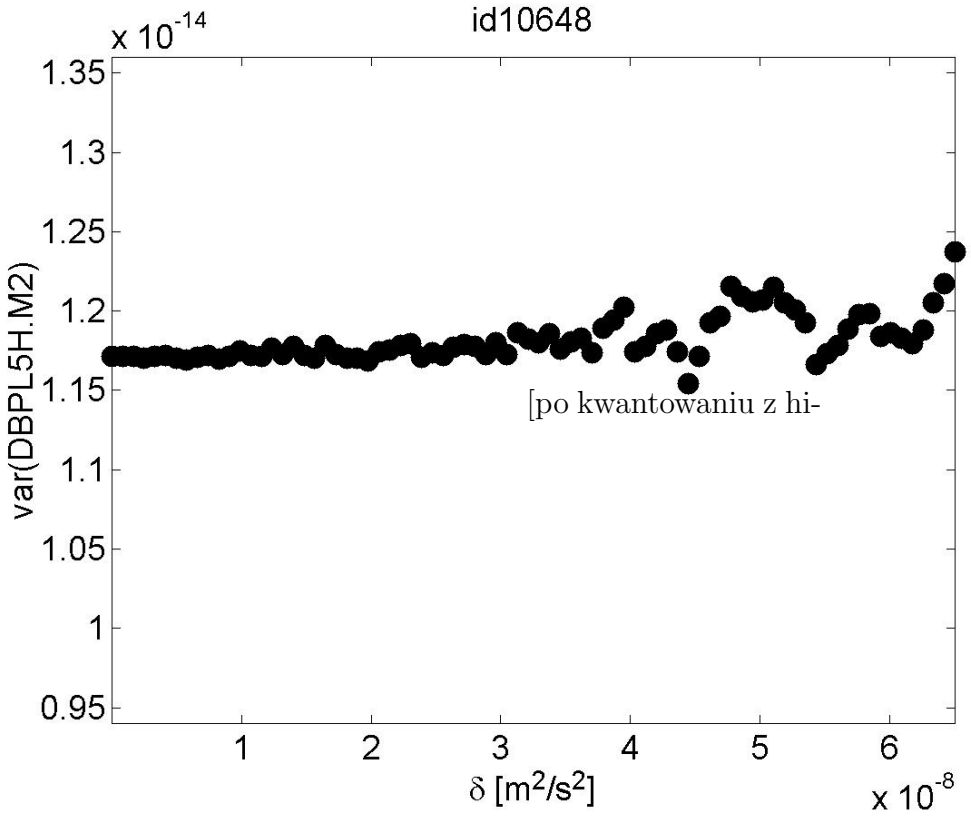
[po kwantowaniu]

[po kwantowaniu z hi-



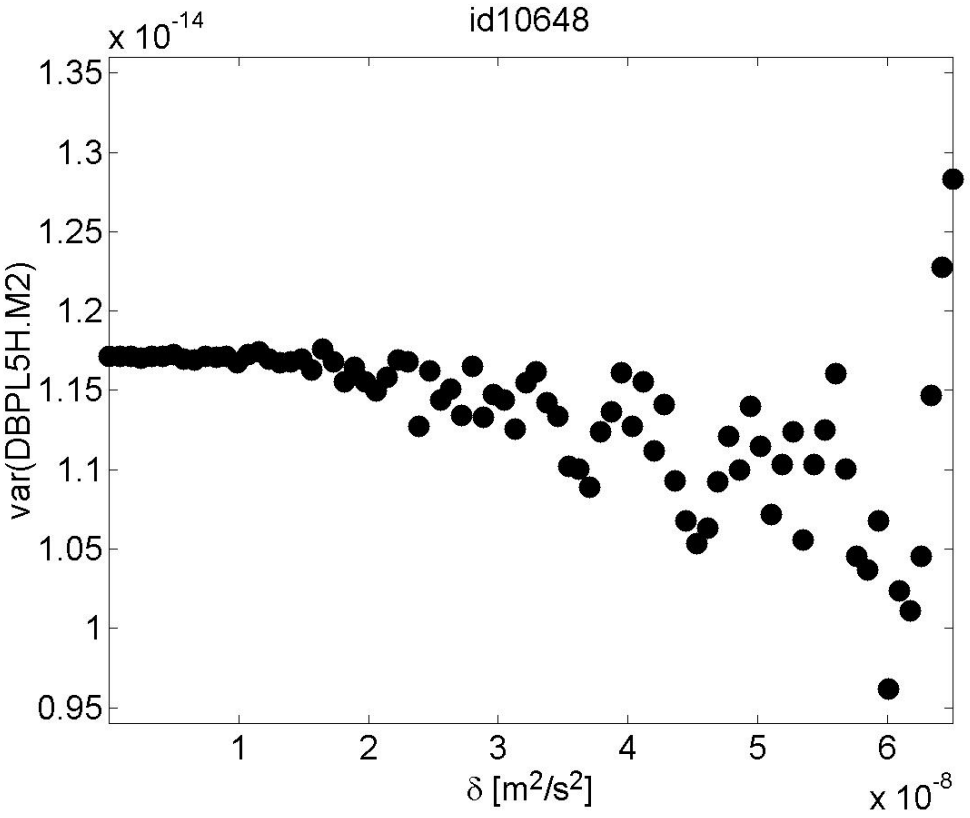
sterezą]

Rysunek 4.7: Wpływ szerokości pasma kwantowania na *odchylenie standardowe* dla DBPL5H.M2



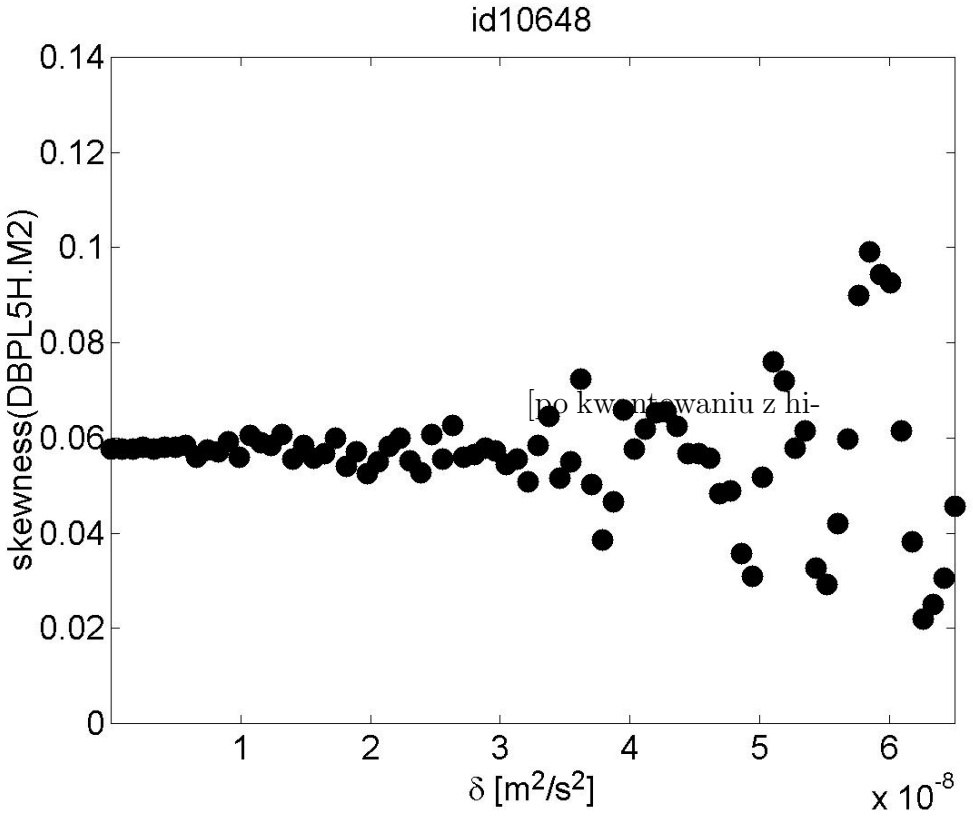
[po kwantowaniu]

[po kwantowaniu z hi-

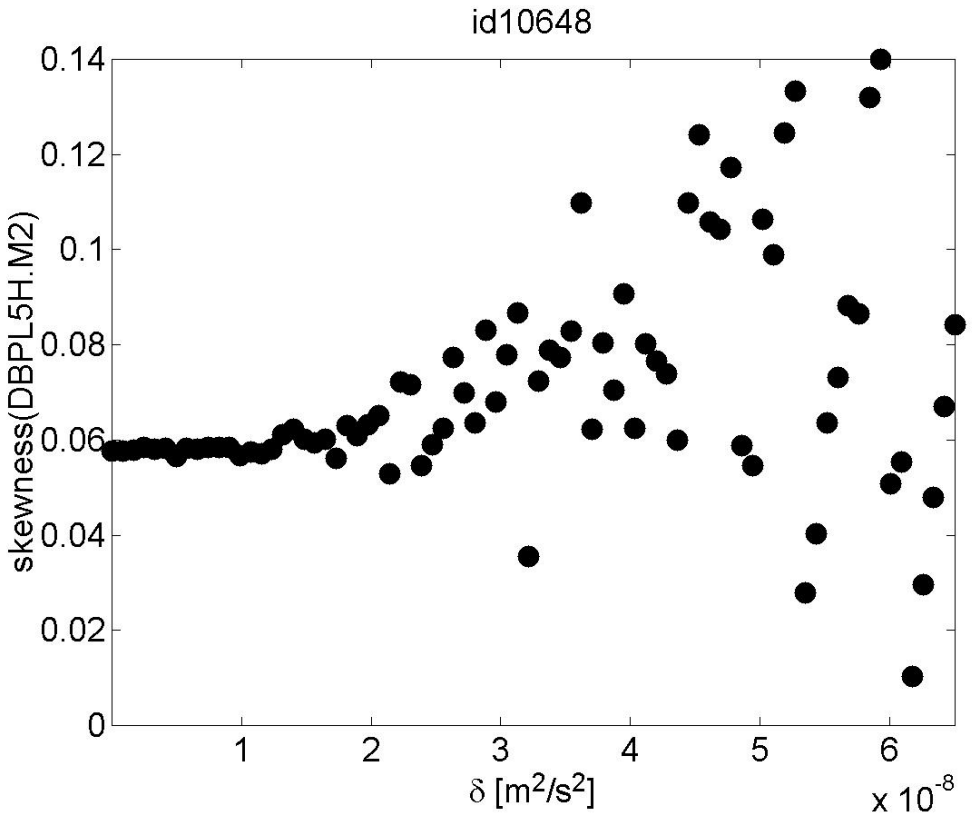


sterezą]

Rysunek 4.8: Wpływ szerokości pasma kwantowania na *wariancję* dla DBPL5H.M2



[po kwantowaniu] [po kwantowaniu z hi-

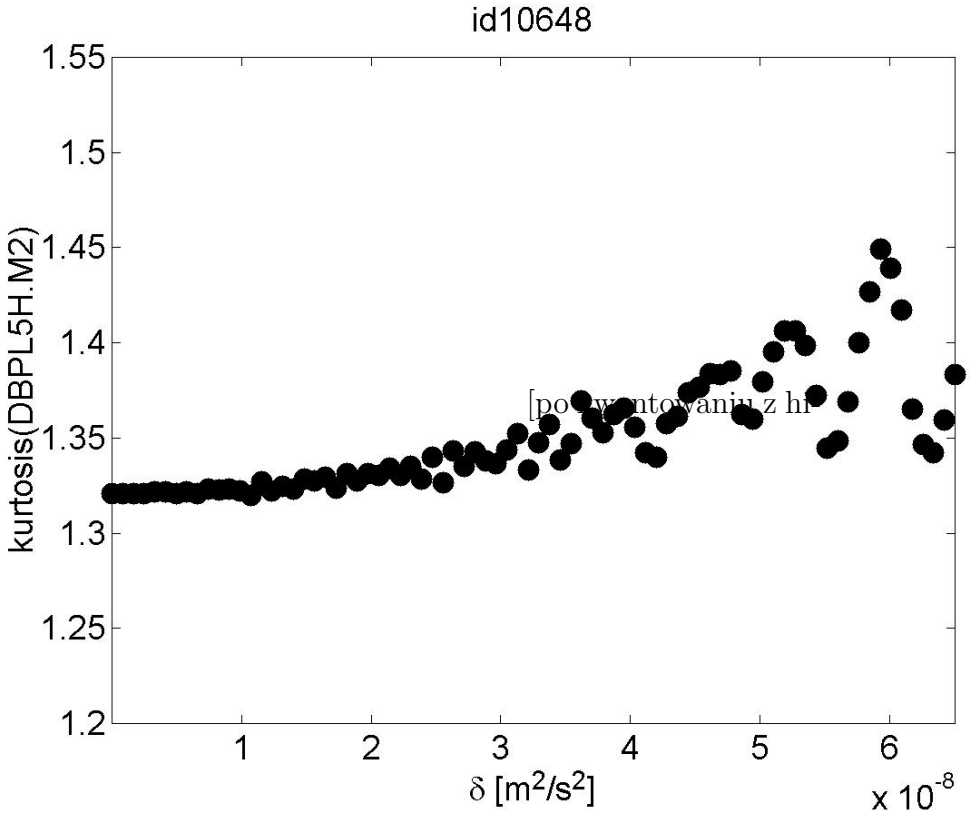


sterezą]

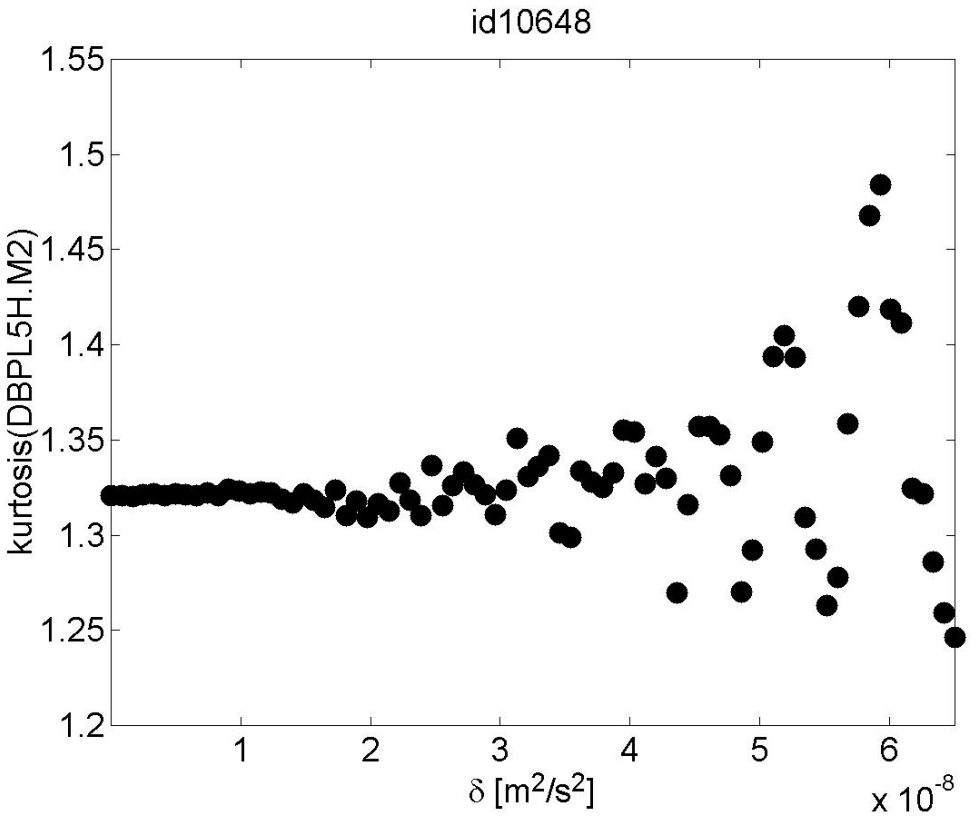
Rysunek 4.9: Wpływ szerokości pasma kwantowania na *skośność* dla DBPL5H.M2

[po kwantowaniu]

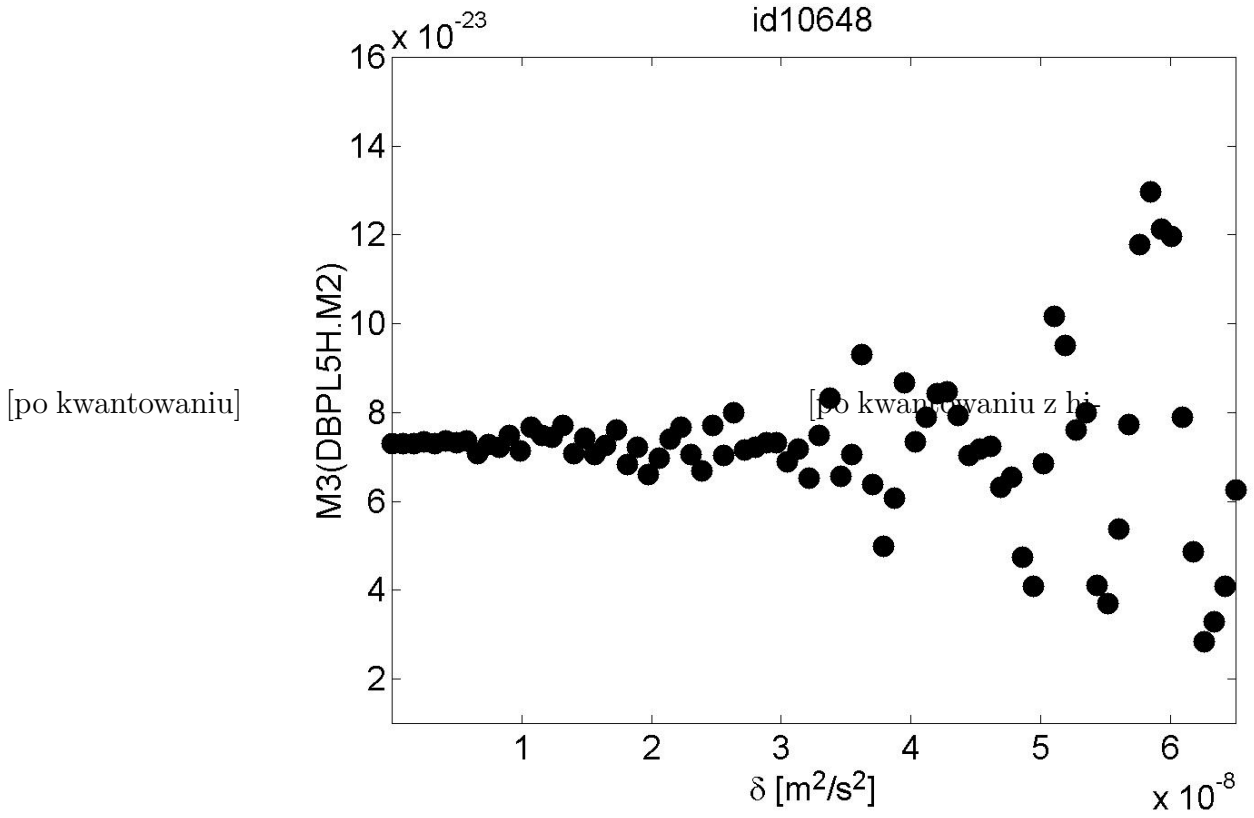
[po kwantowaniu z hi



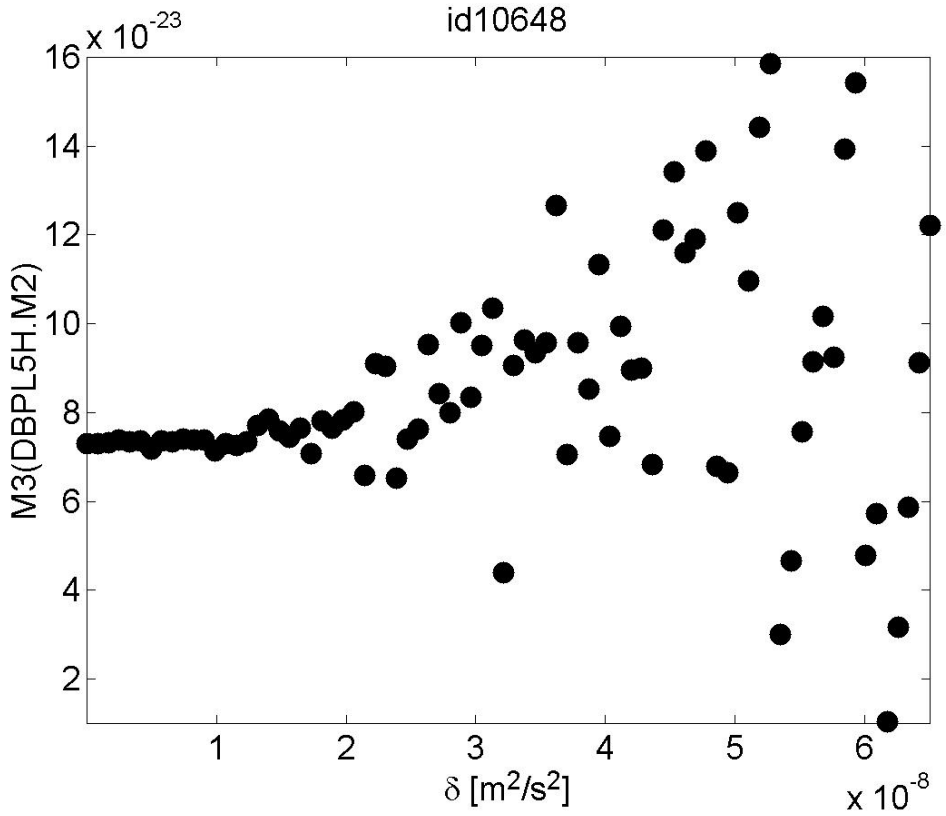
sterezą]



Rysunek 4.10: Wpływ szerokości pasma kwantowania na *kurtozę* dla DBPL5H.M2

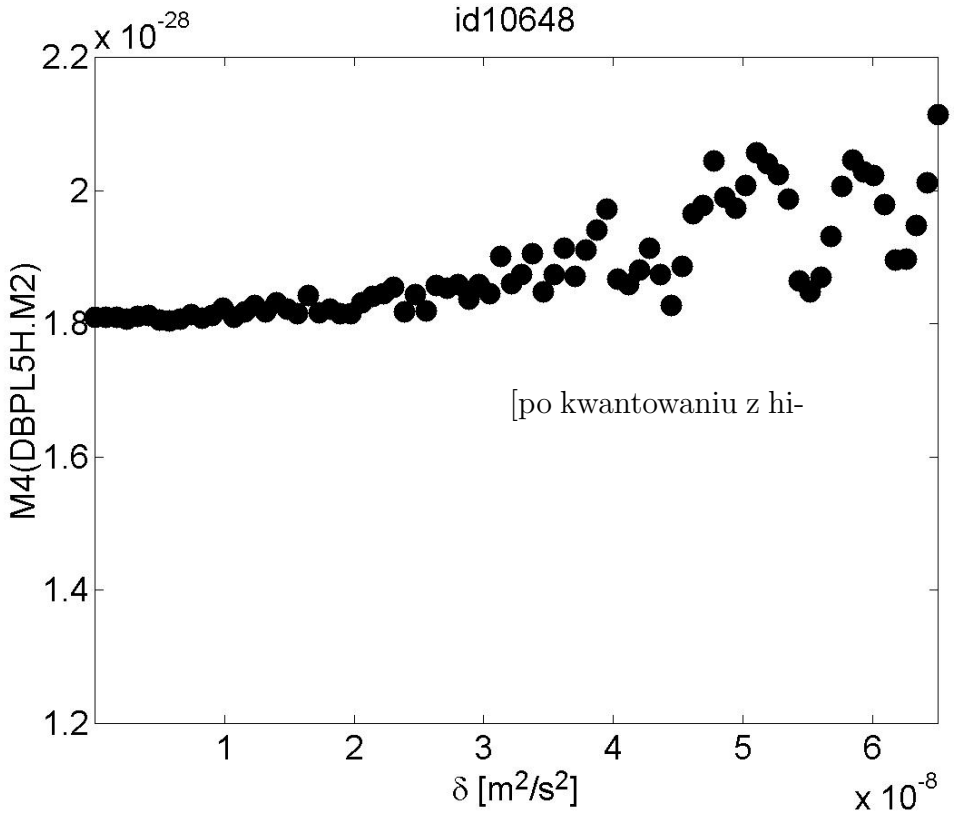


[po kwantowaniu] [po kwantowaniu z hi-



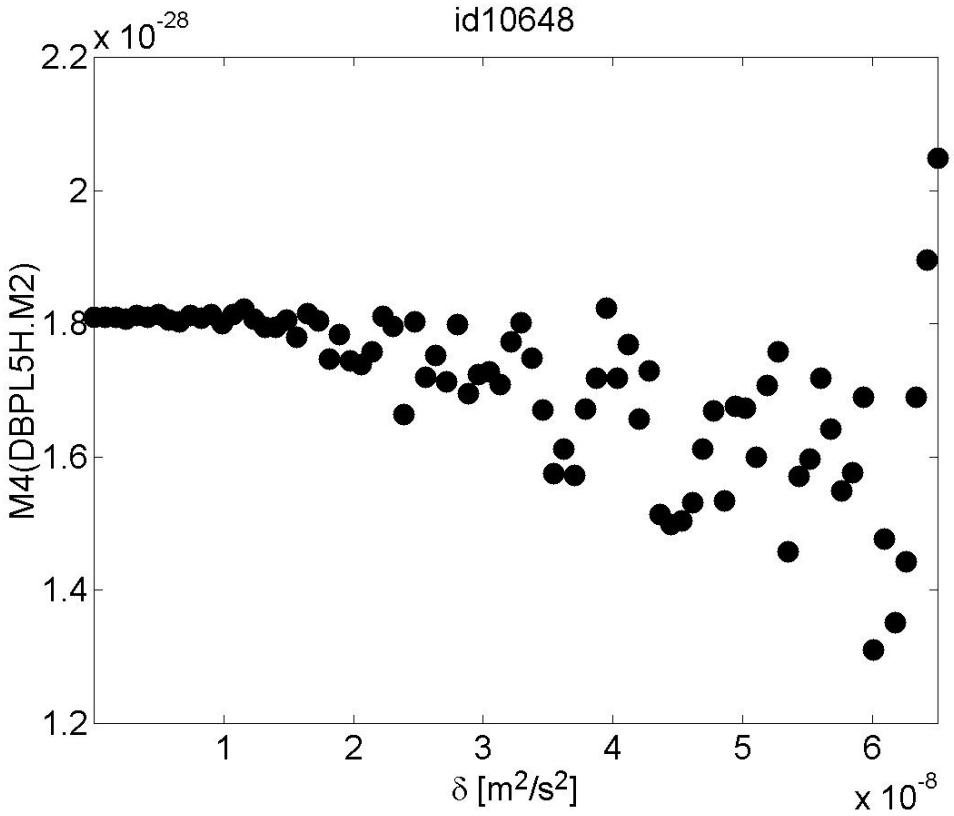
sterezą]

Rysunek 4.11: Wpływ szerokości pasma kwantowania na *moment centralny trzeciego rzędu* dla DBPL5H.M2



[po kwantowaniu]

[po kwantowaniu z hi-



sterezą]

Rysunek 4.12: Wpływ szerokości pasma kwantowania na *moment centralny czwartego rzędu* dla DBPL5H.M2

Na rysunkach przedstawiających wpływ szerokości pasma kwantowania δ na podstawowe charakterystyki określające położenie, stopień rozproszenia oraz symetrię rozkładu, można zauważyć graniczną szerokość pasma kwantowania. Jeżeli szerokość pasma kwantowania jest mniejsza od szerokości granicznej, wówczas jej wpływ na obserwowane charakterystyki jest nieistotny. Tym samym przyjęcie szerokości pasma kwantowania mniejszej od granicznej nie powinno wpłynąć znacząco na proces wnioskowania.

Na podstawie obserwacji korelacji wzajemnej $r(x, \widehat{x})$ wykresu rzeczywistego względem wykresu ograniczonego przez kwantowanie i kwantowanie z histerezą można stwierdzić, iż wraz ze wzrostem szerokości pasma kwantowania współczynnik korelacji (jak należało się spodziewać) maleje. Jednakże trudnym zadaniem jest przyjęcie granicznej wartości współczynnika korelacji, względem którego można przyjąć dopuszczalną szerokość pasma kwantowania. Powodem tego jest duża wartość tego współczynnika nawet dla dużych wartości δ. Dlatego stosowanie analizy korelacji dla potrzeb dopasowania dopuszczalnego stopnia ograniczenia liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech jest niewystarczająca.

Do wyznaczenia dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania proponuje się zastosowanie testu χ^2. Wpływ szerokości pasma kwantowania na poziom istotności tego testu przedstawiono na rysunku 4.14. Dokonując obserwacji uzyskanych wyników, można stwierdzić, iż (podobnie jak to miało miejsce w przypadku analizy zmienności wykresu ograniczonego) dla małych szerokości pasm kwantowania, poziom istotności tego testu zmienia się nieistotnie. Jest to potwierdzenie istnienia dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania. Przyjmując graniczny poziom istotności $\alpha = 0,9$, można wyznaczyć dopuszczalną szerokość pasma kwantowania. W kwantowaniu z histerezą dopuszczalna szerokość pasma kwantowania jest mniejsza niż w kwantowaniu. Powodem tego jest histereza, której zadaniem jest usunięcie szumu na granicach pasm kwantowania, co decyduje o szybszej (niż w przypadku kwantowania) niezgodności względem wykresu rzeczywistego.

Dla wyznaczonej szerokości pasma kwantowania δ można ograniczać liczbę elementów zbioru rozróżnianych wartości cechy przez kwantowanie z histerezą. Tak ograniczony wykres wartości cechy sygnału można poddać ograniczaniu zbioru jego elementów poprzez sklejanie. Połączenie tych dwóch metod pozwala na znaczne ograniczenie wykresów wartości cech. Wpływ szerokości pasma kwantowania na stopień ograniczenia liczby elementów wykresów wartości cech przedstawiono na rysunku 4.15. Miara stopnia ograniczenia MSO określa procentowy stopień redukcji wykresu ograniczonego względem wykresu rzeczywistego. Jak

widać, kwantowanie z histerezą daje lepszy stopień redukcji w stosunku do kwantowania. Potwierdza to słuszność stosowania kwantowania z histerezą, w celu redukcji szumów na granicach pasm kwantowania.

Wyniki optymalizacji szerokości pasma kwantowania zamieszczono w następujących tabelach:

- podstawowe statystyki wykresu DBPL5H.M2 zamieszczono w Tab.4.2,
- wyniki wyznaczonej dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania zamieszczono w Tab.4.3,
- wyniki wyznaczonej dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania z histerezą zamieszczono w Tab.4.4.

Tabela 4.2: Podstawowe statystyki dla DBPL5H.M2(wg [26])

średnia	mediana	std	var	skośność	kurt	M3	M4
3,14e-7	2,91e-7	1,08e-7	1,17e-14	0,06	1,32	7,30e-23	1,81e-28

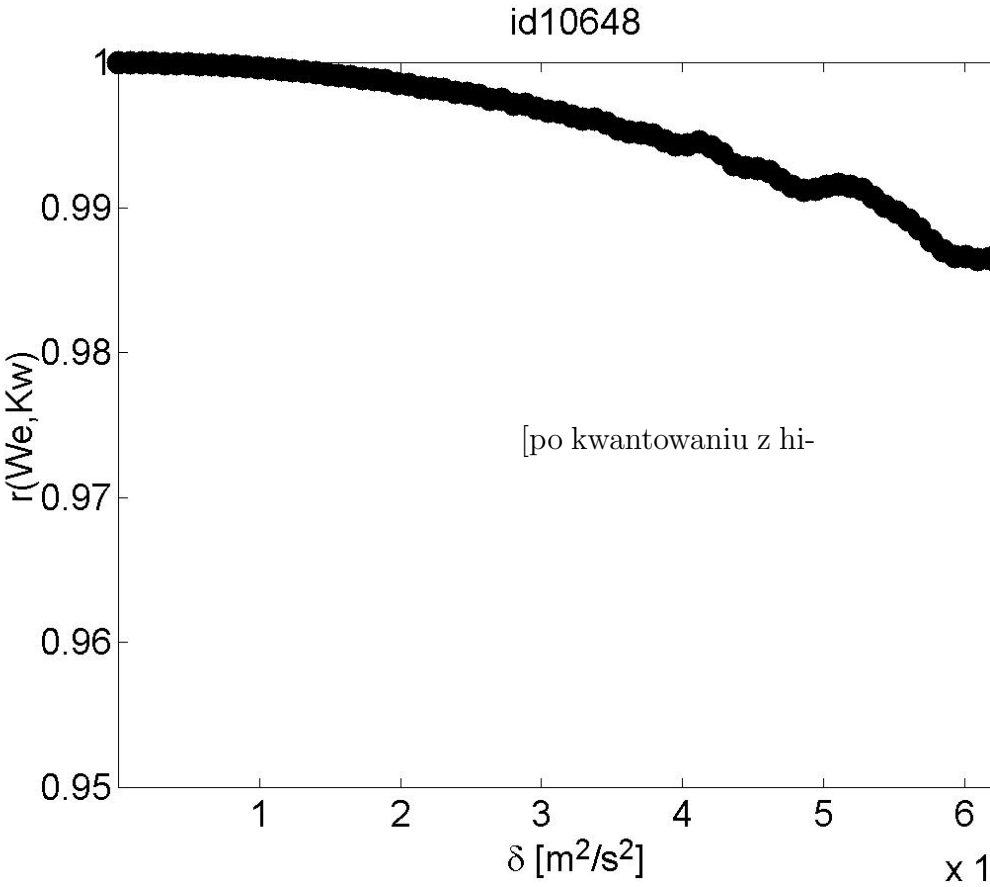
Tabela 4.3: Wyniki wyznaczonej dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania wykresu DBPL5H.M2

średnia	mediana	std	skośność	sig	korelacja	δ	MSO[%]
3,14e-7	2,08e-7	1,082e-7	0,0524	0,91	0,998	2,25e-8	48,0

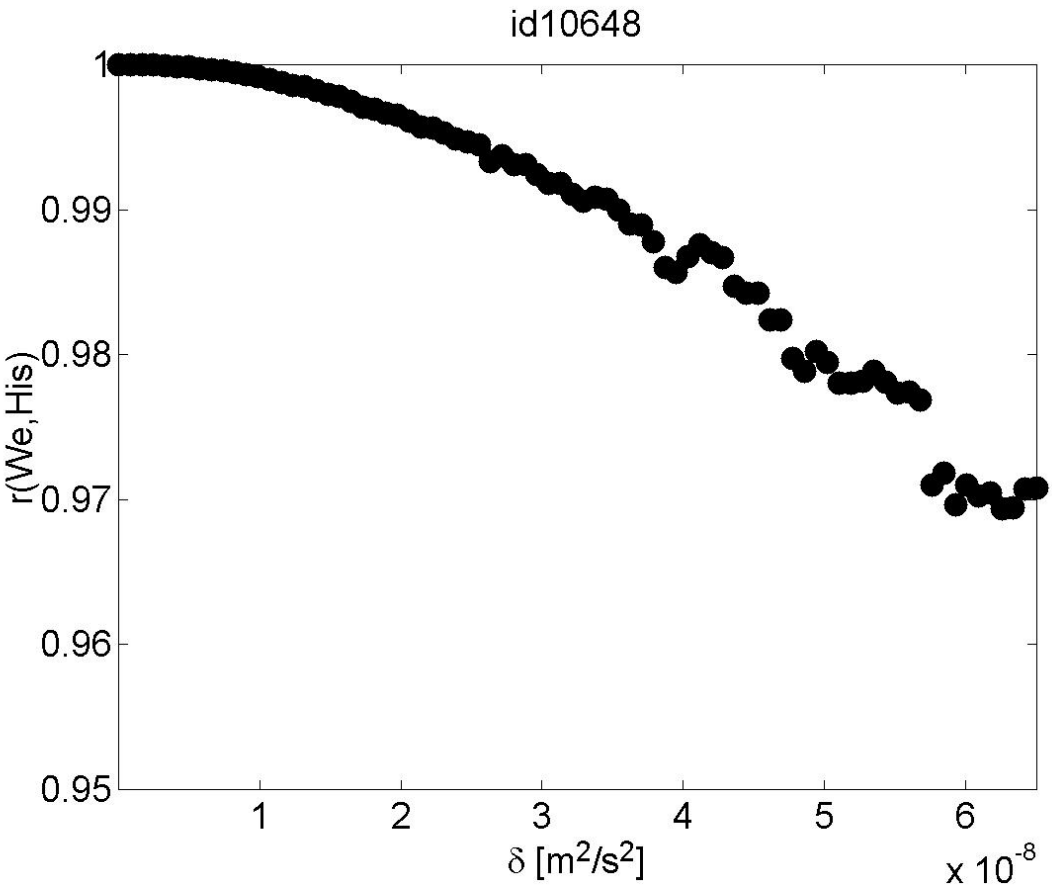
Tabela 4.4: Wyniki wyznaczonej dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania z histerezą wykresu DBPL5H.M2

średnia	mediana	std	skośność	sig	korelacja	δ	MSO[%]
3,14e-7	2,88e-7	1,08e-7	0,0571	0,95	0,998	1,15e-8	62,1

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, iż metoda kwantowania z histerezą w połączeniu z metodą sklejania daje znacznie lepsze rezultaty w zakresie ograniczenia liczby elementów wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych niż zastosowanie metody kwantowania i sklejania. Potwierdza to słuszność i celowość stosowania metody kwantowania z histerezą, której zadaniem jest między innymi redukcja szumów na granicach pasm kwantowania.

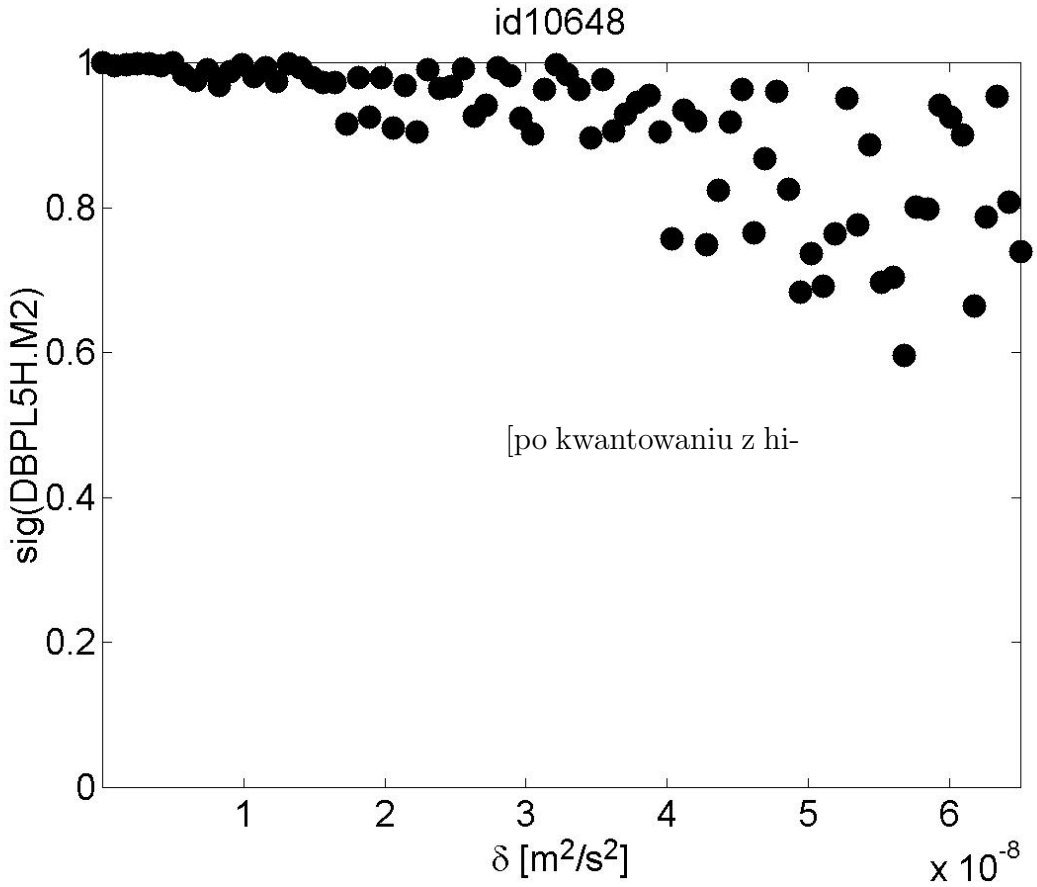


[po kwantowaniu] [po kwantowaniu z hi-

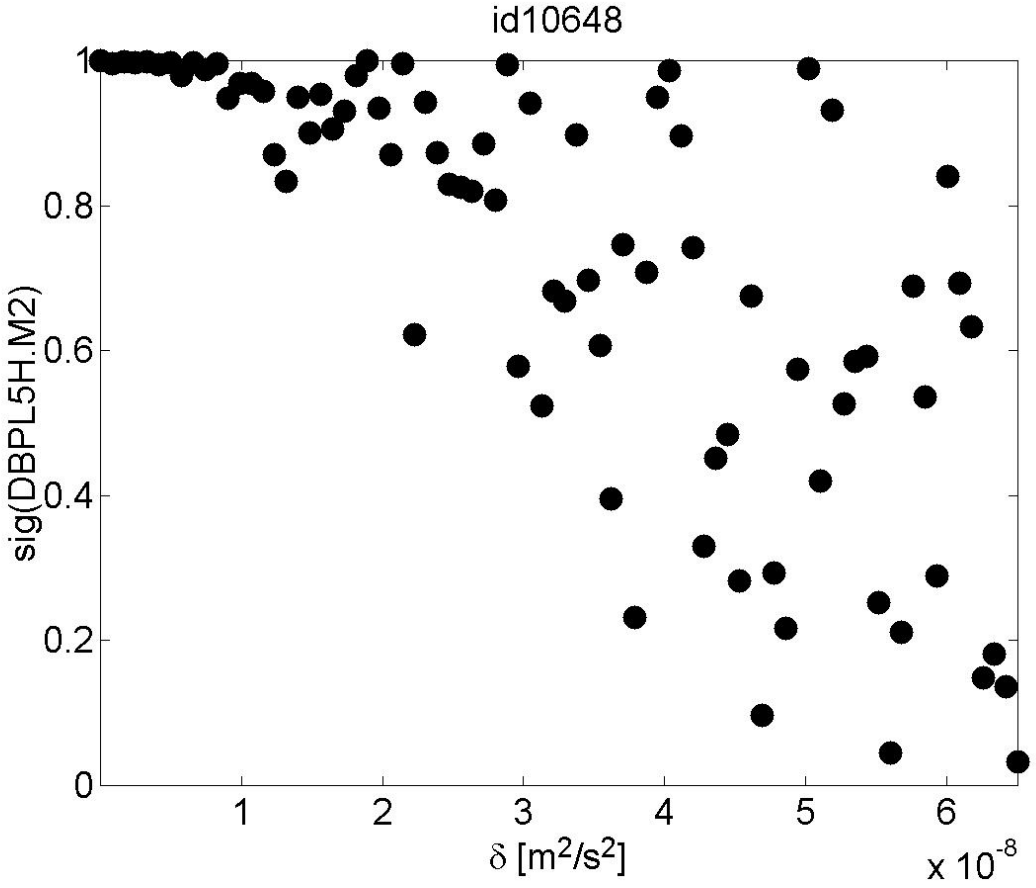


sterezą]

Rysunek 4.13: Wpływ szerokości pasma kwantowania na *korelację wzajemną* $r(x, \widehat{x})$ dla DBPL5H.M2

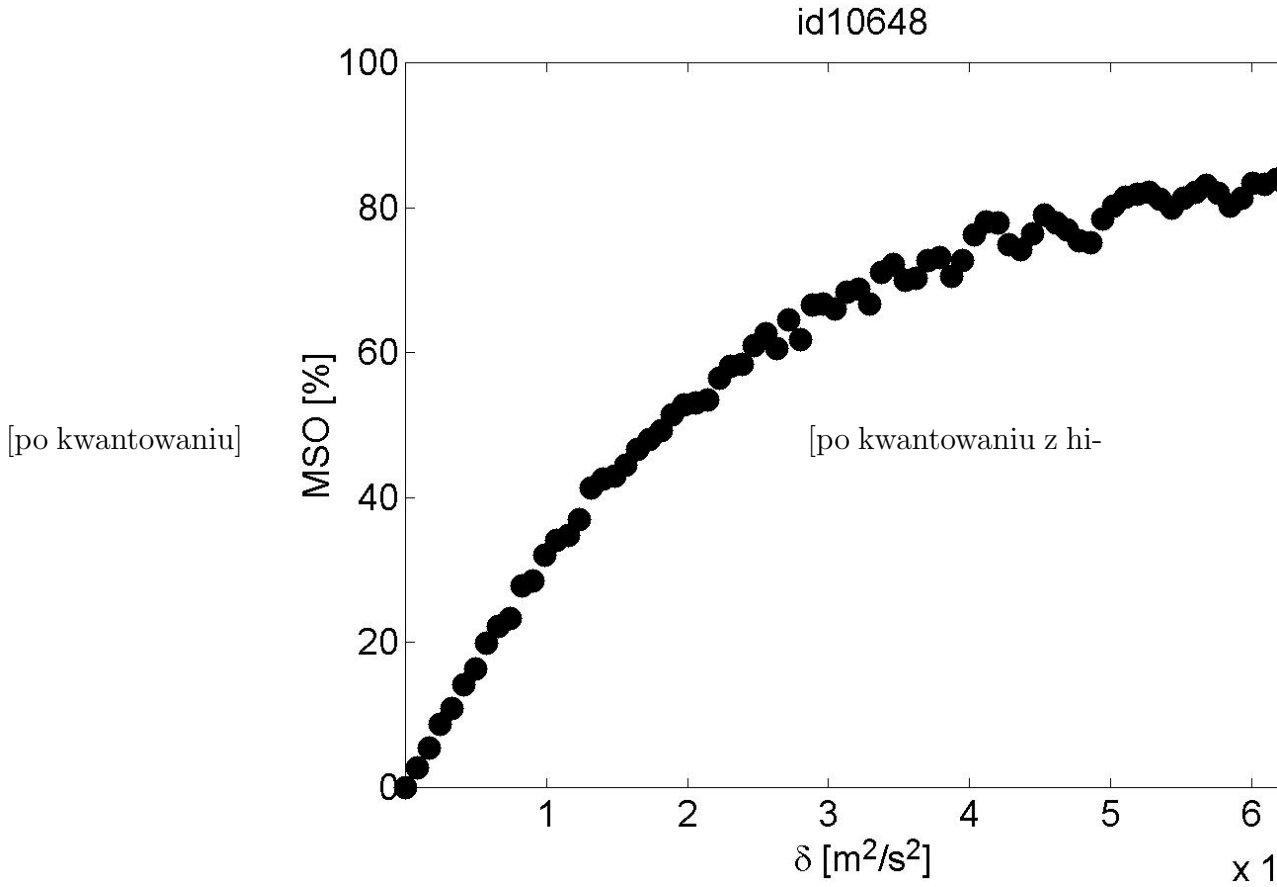


[po kwantowaniu] [po kwantowaniu z hi-

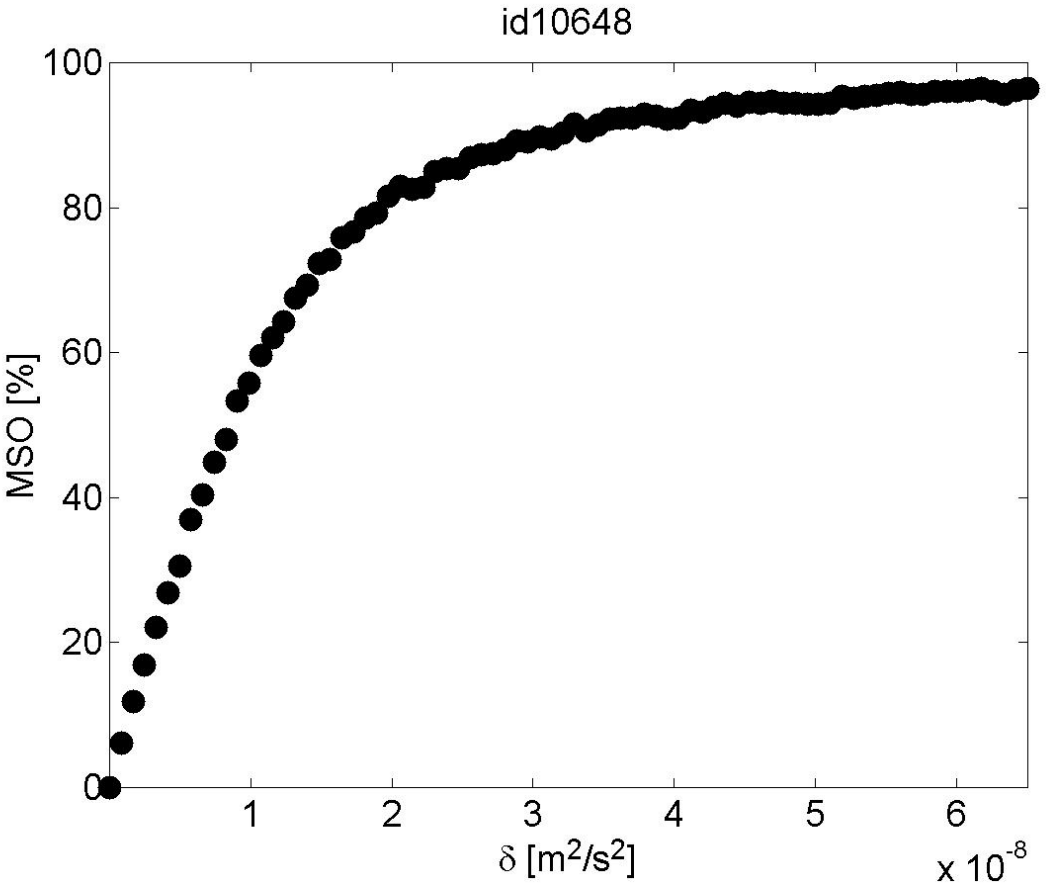


sterezą]

Rysunek 4.14: Wpływ szerokości pasma kwantowania na wyniki testu χ^2 dla DBPL5H.M2



[po kwantowaniu] [po kwantowaniu z hi-



sterezą]

Rysunek 4.15: Wpływ szerokości pasma kwantowania na *miarę stopnia ograniczenia MSO* dla DBPL5H.M2

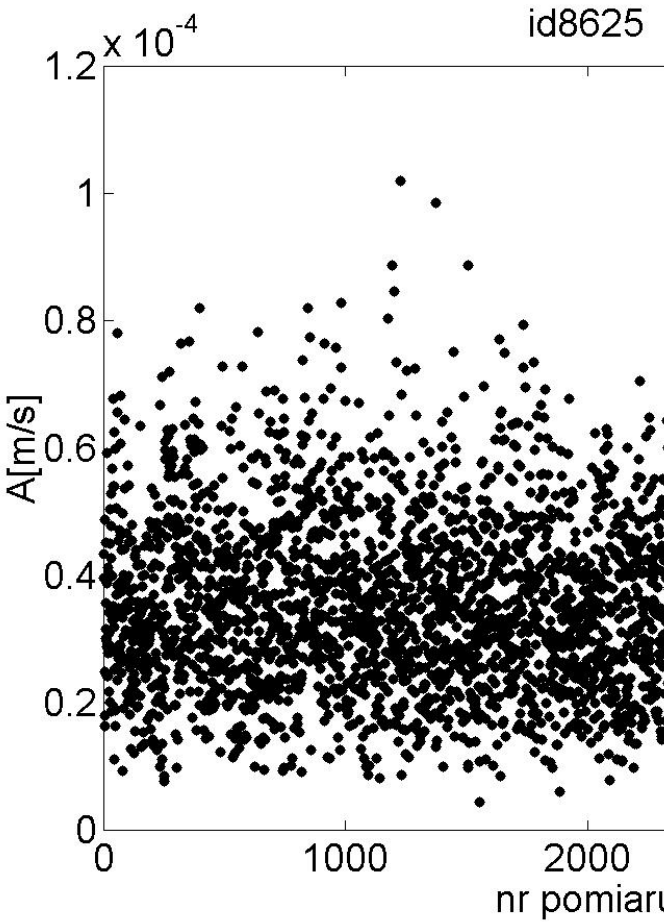
4.4.2 Przykład dla składowych harmonicznych widm

Obserwowano składowe harmoniczne A(1X), A(2X), A(3X) oraz składowe subharmoniczne A(1/3X), A(1/2X), A(2/3X) widm drgań bezwzględnych zmierzonych na obudowie łożyska nr 4 (turbiny TG7 zainstalowanej w elektrowni Kozienice S.A.) w kierunku pionowym. Wykresy wartości tych składowych przedstawiono na rysunku 4.16. Podstawowe statystyki wyznaczone dla tych wykresów zamieszczono w Tab.4.5. Wyniki przeprowadzonych badań dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania zamieszczono w Tab.4.6 oraz Tab.4.7. Ocenę wpływu szerokości pasma kwantowania na zmiany wartości cech statystycznych, zgodność statystyczną dla testu χ^2 jak również korelację $r(x, \widehat{x})$ wykresu ograniczonego po kwantowaniu lub po kwantowaniu z histerezą względem wykresu rzeczywistego przeprowadzono tak jak w rozdziale 4.4.1.

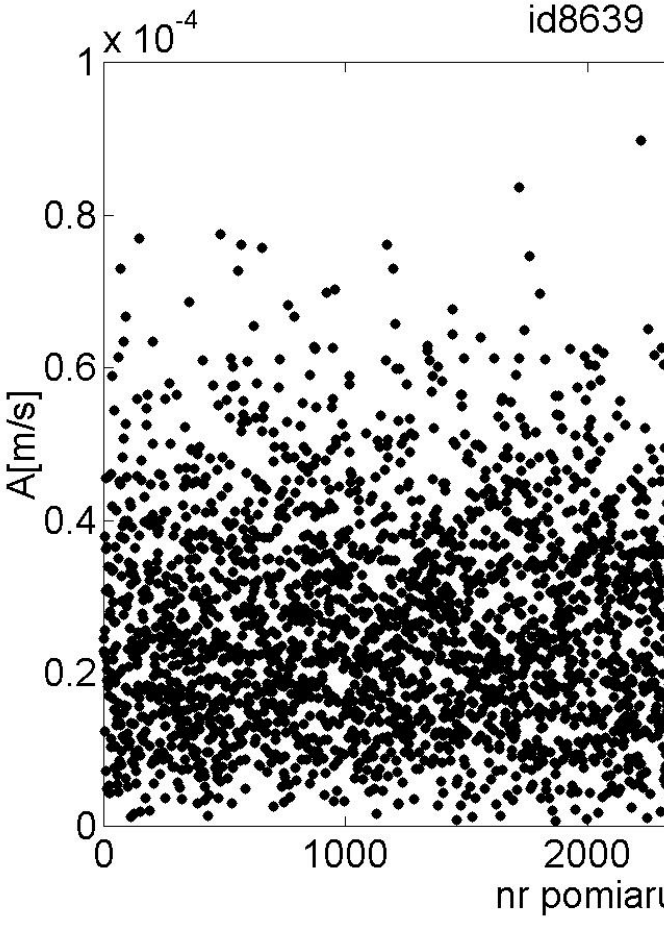
W przypadku składowych subharmonicznych, dla dopasowanej szerokości pasma kwantowania δ, metoda kwantowania i kwantowania z histerezą przynosi te same wyniki. Powodem tego jest niski poziom zarejestrowanych wartości amplitud tych składowych. Można je praktycznie zapisać jako wartość zero. Spodziewane efekty zaobserwowano dla pasm δ wyznaczonych dla składowych harmonicznych. W zamieszczonych tabelach widać wyraźnie, że wyznaczone pasma dla składowych $A(1X)$ i $A(2X)$ są znacznie większe dla kwantowania niż dla kwantowania z histerezą. Zastosowanie sklejania elementów ograniczonych wykresów wartości cech przez kwantowanie z histerezą daje lepsze rezultaty o ponad 15% niż dla ograniczonych wykresów przez kwantowania. Tak więc potwierdza się, iż wprowadzony warunek histerezy bardziej uwrażliwia wykres wartości cechy na zaokrąglenie, natomiast znakomicie likwiduje szum na granicach pasm kwantowania, co widać na rysunkach tych składowych.

Jeżeli wykresy wartości cech zostaną ograniczone przez kwantowanie z histerezą dla wyznaczonego pasma δ, to w wyniku przekroczenia wartości granicznych warunek histerezy będzie utrzymywał daną klasę wartości tak długo, aż względna zmiana wartości dokładnej będzie co najmniej dwukrotnie większa niż szerokość pasma kwantowania. Stłumienie lokalnej dynamiki zmian wartości cechy (szumu na granicach pasm kwantowania) powoduje, że układ wnioskujący systemu doradczego nie będzie wrażliwy na zmiany, które można uznawać za nieistotne.

[DBPL4V.A1/3]



[DBPL4V.A1/2]



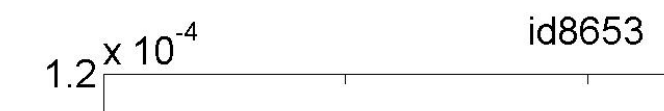


Tabela 4.5: Podstawowe statystyki dla grupy sygnałów DBPL4V.[A1/3 do A3]

id	średnia	mediana	std	var	skośność	kurt	M3	M4
8625	3,53e-5	3,39e-5	1,38e-5	1,91e-10	0,58	3,38	1,55e-15	1,24e-19
8639	2,77e-5	2,58e-5	1,48e-5	2,19e-10	0,63	3,19	2,05e-15	1,53e-19
8653	3,64e-5	3,49e-5	1,48e-5	2,20e-10	0,72	3,81	2,35e-15	1,84e-19
8667	1,36e-3	1,35e-3	9,25e-5	8,56e-9	0,59	2,81	4,65e-13	2,06e-16
8681	1,42e-3	1,33e-3	3,41e-4	1,16e-7	0,26	2,08	1,04e-11	2,80e-14
8717	6,34e-5	6,25e-5	2,06e-5	4,24e-10	0,19	3,45	1,67e-15	6,20e-19

Tabela 4.6: Wyniki wyznaczonej dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania dla DBPL4V.[A1/3 do A3]

id	δ	średnia	mediana	std	skośność	sig	korelacja	MSO[%]
8625	1,03e-5	3,53e-5	3,10e-5	1,42e-5	0,5589	0,9933	0,9778	21,8
8639	9,35e-6	2,77e-5	2,81e-5	1,51e-5	0,6061	0,9480	0,9834	18,7
8653	5,51e-6	3,64e-5	3,30e-5	1,49e-5	0,7055	0,9316	0,9943	10,7
8667	2,23e-5	1,36e-3	1,36e-3	9,27e-5	0,5806	0,9824	0,9976	39,6
8681	7,79e-5	1,42e-3	1,32e-3	3,42e-4	0,2572	0,9631	0,9979	72,8
8717	9,06e-6	6,33e-5	6,34e-5	2,07e-5	0,1753	0,9489	0,9922	17,4

Tabela 4.7: Wyniki wyznaczonej dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania z histerezą dla DBPL4V.[A1/3 do A3]

id	δ	średnia	mediana	std	skośność	sig	korelacja	MSO[%]
8625	5,16e-6	3,53e-5	3,61e-5	1,39e-5	0,5777	0,9575	0,9903	22,7
8639	5,20e-6	2,77e-5	2,60e-5	1,49e-5	0,6273	0,9577	0,9921	19,9
8653	4,41e-6	3,64e-5	3,53e-5	1,49e-5	0,7137	0,9505	0,9946	17,2
8667	1,67e-5	1,36e-3	1,35e-3	9,24e-5	0,5881	0,9686	0,9966	58,8
8681	5,84e-5	1,42e-3	1,34e-3	3,38e-4	0,2814	0,9454	0,9970	89,8
8717	9,06e-6	6,34e-5	6,34e-5	2,07e-5	0,1715	0,9725	0,9842	34,6

4.4.3 Przykład dla składowych stałych

Przeprowadzono również optymalizację szerokości pasma kwantowania dla składowych stałych (CST) przemieszczeń względnych wału turbiny (TG7 zainstalowanej w Elektrowni Kozienice S.A.), zmierzonych w łożyskach nr 1 do nr 7 w kierunkach poziomym (H) i pionowym (V). Wykresy wartości składowych stałych przedstawiono na Rys.4.17, Rys.4.18, Rys.4.19.

Podstawowe statystyki tych wykresów zamieszczono w Tab.4.8. Wyniki optymalizacji szerokości pasma kwantowania zamieszczono w Tab.4.9. Natomiast wyniki optymalizacji szerokości pasma kwantowania z histerezą zamieszczono w Tab. 4.10.

Analizując otrzymane wyniki, należy zaobserwować, iż podobnie jak to miało miejsce w przypadku badania składowych harmonicznych widm, optymalizacja dopuszczalnego stopnia ograniczenia liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości dla składowych stałych przemieszczeń względnych wału turbiny TG7 zainstalowanej w Elektrowni Kozienice S.A. przynosi zadowalające efekty. Dopasowane szerokości pasm dla kwantowania są co najmniej większe od pasm dla kwantowania z histerezą, a mimo to stopień redukcji tak otrzymywanych nowych wykresów (po sklejaniu) jest znacznie mniejszy. Wynika z tego, iż histereza ograniczyła szum na granicach pasm kwantowania. W przypadku, kiedy rzeczywiste wartości cechy będą oscylowały na granicach klas jakościowych, wówczas zastosowanie kwantowania z histerezą spowoduje, iż ograniczona będzie dynamika zmian klas stanu. W konsekwencji układ wnioskujący systemu doradczego nie będzie wrażliwy na nieistotne zmiany wartości cechy w szczególności na granicach klas wartości jakościowych.

Tabela 4.8: Podstawowe statystyki dla składowych stałych przemieszczeń względnych wału turbiny, DWLL[1 do 7]H/V.CST

id	średnia	mediana	std	var	skośność	kurt	M3	M4
8474	7,44e-5	7,59e-5	6,38e-6	4,07e-11	-0,37	1,68	-9,65e-17	2,78e-21
8475	3,58e-4	3,59e-4	5,97e-6	3,56e-11	-0,1	1,54	-2,01e-18	1,95e-21
8476	1,66e-4	1,67e-4	5,32e-6	2,83e-11	-0,35	1,76	-5,21e-17	1,40e-21
8478	4,56e-4	4,55e-4	4,68e-6	2,19e-11	0,46	2,20	4,69e-17	1,06e-21
8479	4,56e-4	4,55e-4	4,68e-6	2,19e-11	0,46	2,20	4,69e-17	1,06e-21
8480	3,76e-4	3,76e-4	1,11e-6	1,22e-12	0,13	2,44	1,80e-19	3,65e-24
8481	-1,15e-5	-1,13e-5	1,42e-6	2,01e-12	-0,12	2,48	-3,50e-19	1,00e-23
8482	5,87e-4	5,88e-4	2,47e-6	6,12e-12	-0,22	2,85	-3,38e-18	1,07e-22
8483	-1,78e-5	-1,78e-5	1,12e-6	1,26e-12	-0,04	2,26	-5,08e-20	3,58e-24
8484	6,58e-4	6,58e-4	1,29e-6	1,66e-12	-0,07	2,31	-1,43e-19	6,33e-24
8485	-5,71e-5	-5,69e-5	1,55e-6	2,42e-12	-0,44	2,51	-1,64e-18	1,46e-23
8486	7,21e-4	7,21e-4	1,78e-6	3,18e-12	-0,09	2,22	-5,14e-19	2,25e-23
8487	2,71e-4	2,72e-4	1,57e-6	2,46e-12	-0,22	1,96	-8,43e-19	1,18e-23
8488	2,60e-4	2,60e-4	1,67e-6	2,80e-12	-2,03	27,87	-9,49e-18	2,18e-22

[DWLL1H.CST]
[DWLL1V.CST]
[DWLL2H.CST]
[DWLL2V.CST]
[DWLL3H.CST] [DWLL3V.CST]

Rysunek 4.17: Wykresy wartości składowych stałych przemieszczeń względnych wału turbiny w łożyskach nr 1 do 3

[DWLL4H.CST]
[DWLL4V.CST]
[DWLL5H.CST]
[DWLL5V.CST]
[DWLL6H.CST] [DWLL6V.CST]

Rysunek 4.18: Wykresy wartości składowych stałych przemieszczeń względnych wału turbiny w łożyskach nr 4 do 6

Tabela 4.9: Wyniki poszukiwania dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania dla składowych stałych DWLL[1-7]H/V.CST

id	δ	średnia	mediana	std	skośność	sig	korelacja	MSO[%]
8474	7,50e-7	7,44e-5	7,57e-5	6,38e-6	-0,3716	0,9313	0,9994	47,7
8475	2,18e-6	3,58e-4	3,58e-4	6,04e-6	-0,0131	0,9154	0,9945	65,8
8476	9,06e-7	1,66e-4	1,67e-4	5,31e-6	-0,3459	0,9907	0,9988	54,8
8478	1,26e-6	4,56e-4	4,55e-4	4,71e-6	0,4552	0,9933	0,9969	37,2
8479	1,26e-6	4,56e-4	4,55e-4	4,71e-6	0,4552	0,9933	0,9969	37,2
8480	6,32e-8	3,76e-4	3,76e-4	1,11e-6	0,1310	0,9819	0,9999	1,2
8481	3,31e-7	-1,15e-5	-1,13e-5	1,42e-6	-0,1239	0,9817	0,9976	47,5
8482	4,92e-7	5,87e-4	5,87e-4	2,47e-6	-0,2267	0,9960	0,9983	36,3
8483	1,60e-7	-1,78e-5	-1,77e-5	1,12e-6	-0,0346	0,9328	0,9992	12,5
8484	3,51e-7	6,58e-4	6,59e-4	1,30e-6	-0,0572	0,9053	0,9969	20,4
8485	3,35e-7	-5,72e-5	-5,70e-5	1,56e-6	-0,4299	0,9416	0,9982	43,0
8486	1,20e-7	7,21e-4	7,21e-4	1,78e-6	-0,0921	0,9923	0,9998	7,0
8487	2,46e-7	2,71e-4	2,71e-4	1,57e-6	-0,2171	0,9551	0,9990	40,1
8488	2,98e-7	2,60e-4	2,60e-4	1,68e-6	-2,0512	0,9963	0,9987	56,5

[DWLL7H.CST] [DWLL7V.CST]

Rysunek 4.19: Wykresy wartości składowych stałych przemieszczeń względnych wału turbiny w łożysku nr 7

Tabela 4.10: Wyniki poszukiwania dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania z histerezą dla składowych stałych DWLL[1-7]H/V.CST

id	δ	średnia	mediana	std	skośność	sig	korelacja	MSO[%]
8474	6,00e-7	7,44e-5	7,56e-5	6,40e-6	-0,3697	0,9124	0,9991	64,5
8475	5,46e-7	3,58e-4	3,59e-4	5,97e-6	-0,0060	0,9583	0,9992	46,5
8476	6,27e-7	1,66e-4	1,67e-4	5,30e-6	-0,3488	0,9302	0,9986	66,5
8478	6,30e-7	4,56e-4	4,56e-4	4,68e-6	0,4584	0,9221	0,9984	37,2
8479	6,30e-7	4,56e-4	4,56e-4	4,68e-6	0,4584	0,9221	0,9984	37,2
8480	2,11e-7	3,76e-4	3,76e-4	1,10e-6	0,1134	0,9820	0,9960	75,4
8481	1,93e-7	-1,15e-5	-1,14e-5	1,42e-6	-0,1084	0,9729	0,9979	63,8
8482	5,74e-7	5,87e-4	5,88e-4	2,50e-6	-0,2146	0,9400	0,9938	70,9
8483	1,60e-7	-1,78e-5	-1,77e-5	1,12e-6	-0,0342	0,9738	0,9981	32,2
8484	4,29e-7	6,58e-4	6,59e-4	1,29e-6	-0,0809	0,9982	0,9883	54,9
8485	2,87e-7	-5,71e-5	-5,69e-5	1,55e-6	-0,4499	0,9054	0,9961	72,3
8486	3,20e-7	7,21e-4	7,21e-4	1,78e-6	-0,0904	0,9006	0,9966	56,5
8487	2,27e-7	2,71e-4	2,71e-4	1,56e-6	-0,2199	0,9588	0,9977	75,0
8488	1,49e-7	2,60e-4	2,60e-4	1,67e-6	-2,0185	0,9892	0,9990	63,4

4.5 Wnioski

Przeprowadzona weryfikacja zaproponowanej metody optymalizacji dopuszczalnego ograniczenia liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów diagnostycznych dla danych pozyskanych z obiektu rzeczywistego, jakim był turbozespół 200MW zainstalowany jako blok numer 7 (TG7) w Elektrowni Kozienice S.A, pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- zastosowanie reprezentacji parametrycznej cech sygnałów diagnostycznych umożliwia dalszą redukcję zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów oraz redukcję liczby elementów wykresów wartości cech sygnałów;
- wraz ze wzrostem szerokości pasma kwantowania wzrasta rozrzut miar zmienności względem miar wyznaczanych dla wykresu rzeczywistego;
- oceniając wyniki miar zmienności w funkcji szerokości pasma kwantowania, można zaobserwować wyraźną wartość graniczną δ_g, poniżej której rozrzut jest niewielki, natomiast powyżej tej wartości granicznej rozrzut gwałtownie wzrasta. Zaobserwowana wartość graniczna jest poszukiwaną szerokością pasma kwantowania;

- stosowanie kwantowania z histerezą (w przeciwieństwie do kwantowania) umożliwia usunięcie lokalnych oscylacji (szumu) wartości cech na granicach pasm kwantowania, można to zauważyć porównując wyniki miar zmienności w funkcji δ dla kwantowania i dla kwantowania z histerezą, gdzie dla kwantowania z histerezą wartości tych miar dłużej utrzymują niezmienność względem wartości początkowej;

- zastosowanie analizy korelacyjnej do określenia dopuszczalnego stopnia ograniczenia przez kwantowanie z histerezą jest niewystarczające, jednak analiza ta może być stosowana w celu obserwacji kierunku zmian wykresów ograniczonych względem wykresów rzeczywistych;

- zastosowanie analizy statystycznej (np. testu χ^2) pozwala wyznaczyć dopuszczalny stopień ograniczenia liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości;

- do ograniczenia wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych zaleca się stosowanie metody kwantowania z histerezą, a następnie sklejanie elementów tak ograniczonego wykresu;

- weryfikację poprawności wyznaczonego dopuszczalnego ograniczenia wykresów wartości cech należy przeprowadzić na podstawie miar błędu klasyfikacji QK;

- do oceny stopnia redukcji wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych uzyskanych w wyniku zastosowania reprezentacji parametrycznej, kwantowania z histerezą i sklejania wartości można stosować zaproponowaną miarę MJO;

- zaproponowana metoda ograniczenia wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych przez kwantowanie z histerezą pozwala na jakościową ocenę tak ograniczonych wykresów.

Rozdział 5

Podsumowanie i wnioski

5.1 Podsumowanie

Proces wnioskowania o stanie maszyny, a potem podejmowania decyzji o jej dalszej eksploatacji, może być wspomagany komputerowo za pomocą dynamicznych systemów doradczych. W celu wspomagania procesu wnioskowania realizowanego przez te systemy opracowywane są układy pomiarowe wykonujące wiele działań, wśród których należy wyróżnić: przetwarzanie analogowo-cyfrowe, filtrację, wyznaczanie podstawowych ocen punktowych, skalowanie, analizę sygnału opartą na szybkiej transformacie Fouriera, wyznaczanie wartości jakościowych, zapisywanie wyznaczanych wartości w bazie danych. Wyznaczane przez te układy oceny punktowe jednowymiarowe czy też wielowymiarowe poddawane są ocenie jakościowej, na podstawie której system doradczy generuje wnioski o stanie obserwowanego obiektu. Stosowanie jakościowej oceny wartości cech sygnałów umożliwia budowanie reguł uogólnionych. Pozwala to na znaczną redukcję definiowanych i rozpatrywanych przez system reguł. Do uzyskania jakościowej oceny cech sygnałów diagnostycznych stosowane są różnego rodzaju metody dyskretyzacji. Głównym celem jest dyskretyzacja wartości cechy do kilku wartości jakościowych. Inną formą pozyskiwania jakościowych ocen cech sygnałów diagnostycznych jest metoda grupowania. Umożliwia ona uzyskanie reprezentantów klas wartości. Metoda ta stosowana jest często wówczas, gdy ocena jakościowa może być przeprowadzona na podstawie wyznaczonych miar podobieństwa względem reprezentantów klas. Możliwe jest również stosowanie algorytmów klasyfikacji rozmytej. Skomplikowany zapis algorytmów klasyfikacji nie pozwala na szybką realizację oceny jakościowej, co w systemach ciągłego monitorowania jest priorytetem. Przedstawione w rozprawie metody definiowania klasyfikatorów będących podstawą wyznaczania

wartości jakościowych są ogólnie znane i nie wymagają rozwijania.

Nowoczesne układy pomiarowe dostarczają dość licznych zbiorów wartości cech, co przy wymogach stawianych układom ciągłego monitorowania powoduje konieczność stosowania metod redukcji zbioru danych. To przede wszystkim względy optymalizacyjne decydują, iż niemożliwe staje się gromadzenie wszystkich danych w postaci dokładnej. Często niewystarczające jest gromadzenie wyników jedynie w postaci ocen jakościowych. Problemy wynikające z gromadzenia danych spowodowały, iż uwaga skoncentrowana została na wstępnym przetwarzaniu danych.

Celem badań opisywanych w tej pracy było znalezienie takiej metody postępowania, która umożliwi znaczne ograniczenie liczby gromadzonych danych, nie pociągając za sobą zmiany wniosków generowanych przez układ wnioskujący systemu doradczego o stanie technicznym obiektu.

W rozprawie opisano trzy grupy metod redukcji danych dostarczanych przez układy pomiarowe: ograniczanie liczby uwzględnianych cech, ograniczanie liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech oraz ograniczanie liczby elementów wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych. Do metod ograniczania liczby cech można zaliczyć m.in. działania zmierzające do wyznaczenia cech reprezentatywnych oraz działania zmierzające do wyznaczenia nowych cech. W związku z obszerną literaturą dotyczącą ograniczania liczby cech jak również prowadzonymi badaniami (m.in. w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn), których celem jest określenie nowych cech będących łączną oceną rozpatrywanego zbioru cech, w rozprawie problem ten został jedynie zasygnalizowany. Przykładem ograniczania liczby cech opisanym w pracy jest reprezentacja parametryczna. Reprezentacja ta umożliwia rozpatrywanie każdego parametru (cechy) oddzielnie.

Ograniczanie liczby elementów wykresów wartości cech najczęściej dotyczy ustalenia częstości pobierania danych. Zbyt mała częstość może spowodować brak dostatecznej informacji o zjawiskach zachodzących w obserwowanym obiekcie. Natomiast duża częstość pobierania danych może spowodować nadmiarowość danych oraz może być przyczyną nieprawidłowości w funkcjonowaniu systemu doradczego. Sposobem umożliwiającym rozwiązanie tych problemów jest metoda sklejania elementów wykresów wartości cech zaproponowana przez W. Cholewę podczas realizacji pracy KBN 7T07B 047 16. Metoda sklejania może być stosowana dla wykresów wartości cech, których liczba elementów rozróżnianych wartości cech jest ograniczona.

W pracy szczególną uwagę zwrócono na metody ograniczania liczby elemen-

tów zbioru rozróżnianych wartości cech sygnałów. Można wyróżnić metody dynamicznego ograniczania *on-line* oraz ograniczania danych historycznych *off-line*. Z uwagi na liczność zbiorów wartości cech sygnałów dostarczanych przez układy akwizycji, w pracy skoncentrowano się na dynamicznym ograniczaniu tych danych. Jedną z takich metod jest kwantowanie równomierne. Badania weryfikacyjne takiego postępowania wykazały, że uzyskane wyniki są niezadowalające. Powodem tego jest duża wrażliwość układu wnioskowania na nieistotne zmiany wartości, czy też zmiany na granicach pasm kwantowania (szum kwantowania). W celu zwiększenia możliwości metody kwantowania autor pracy zaproponował metodę kwantowania z histerezą. Metoda kwantowania z histerezą została opracowana w celu ograniczania liczby elementów zbiorów rozróżnianych wartości cech sygnałów oraz do ograniczania szumów kwantowania występujących na granicach pasm kwantowania. Sygnał poddawany takiemu kwantowaniu składa się ze składowej o małej prędkości zmian oraz z szumu w paśmie o wyższych częstotliwościach. Zaproponowana metoda kwantowania z histerezą powoduje, iż system wnioskowania nie jest wrażliwy na szumy w paśmie o wyższych częstotliwościach wykresu wartości cechy. Zastosowanie kwantowania z histerezą możliwe jest po uprzednim określeniu dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania. Do tego celu zaproponowano metodę optymalizacji szerokości pasma kwantowania, która opiera się na ilościowej analizie zmienności charakterystyk rozkładu statystycznego określających położenie, stopień rozproszenia oraz symetrię rozkładu. Ponadto w ramach optymalizacji szerokości pasma kwantowania proponuje się przeprowadzenie analizy statystycznej ograniczonych wykresów względem wykresów rzeczywistych, przy czym przez ograniczony wykres rozumie się taki wykres w którym ograniczono liczbę elementów zbioru rozróżnianych wartości cech. Przyjęto, że jeżeli wykresy rzeczywiste charakteryzują się określonym rozkładem statystycznym, to dopuszczalnym ograniczeniem jest takie ograniczenie, dla którego wynik testu statystycznego nie wyklucza przyjętej hipotezy zerowej na przyjętym poziomie istotności, mówiącej o zgodności pomiędzy rozpatrywanymi wykresami.

Weryfikację metody kwantowania z histerezą oraz metody sklejania elementów wykresów wartości cech przeprowadzono dla danych pozyskanych z obiektu rzeczywistego, jakim był turbozespół 200MW zainstalowany jako blok numer 7 w Elektrowni Kozienice S.A. Sformułowany cel rozprawy został osiągnięty. W rozprawie zaprezentowano tylko fragment wykonanych obliczeń.

5.2 Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań potwierdzono słuszność tez określonych w rozdziale 1.3. Sformułowano następujące wnioski:

1. zaproponowana metoda kwantowania z histerezą ogranicza szumy występujące na granicach pasm kwantowania, przez co układ wnioskujący systemu doradczego nie jest wrażliwy na szumy w paśmie o wyższych częstotliwościach sygnału, którego elementy generowane są w czasie *makro*,

2. zaproponowana metoda ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech wraz z równoczesnym sklejaniem elementów umożliwia znaczną redukcję wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych,

3. pomimo znacznego ograniczenia liczby gromadzonych wartości cech sygnałów diagnostycznych możliwe jest wyznaczanie ich jakościowych ocen,

4. poprawność dopasowania dopuszczalnego stopnia ograniczania wykresów wartości cech sygnałów można weryfikować metodami jakościowej oceny cech sygnałów diagnostycznych z zastosowaniem zaproponowanych miar jakości,

5. metoda kwantowania z histerezą nie wprowadza istotnych zniekształceń wartości jakościowych cech sygnałów, rozumianych jako takie zniekształcenia, które pociągają za sobą zmianę wniosków generowanych przez układ wnioskujący o stanie technicznym obiektu,

6. opracowana przez autora rozprawy metoda kwantowania z histerezą może mieć zastosowanie do:

   - przetwarzania danych dostarczanych przez układy monitorujące, w celu ich racjonalnego składowania w bazach danych,
   - wstępnego przetwarzania sygnałów umożliwiającego parametryczne wyznaczanie jakościowych klas sygnałów,
   - wyznaczania wartości cech sygnałów generowanych przez układy nieliniowe, w tym sygnałów wielokanałowych.

Literatura

[1] Babuska R., Verbruggen H.B.: *Fuzzy modeling and model-based control for nonlinear systems. Applications of Fuzzy Logic.* Series on Environmental and Intelligent Manufacturing Systems. Prentice Hall, 1997.

[2] Barszczewski L.: *Klasyfikacja łozysk tocznych na podstawie sygnałów wibroakustycznych.* Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice, 1990.

[3] Bartoszewicz J.: *Wykłady ze statystyki matematycznej.* PWN, Warszawa, 1989.

[4] Bellman R.: *Adaptacyjne procesy sterowania.* PWN, Warszawa, 1965.

[5] Bendat J.S., Piersol A.G.: *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych.* PWN, Warszawa, 1976.

[6] Benjamin J.R., Cornell C.A.: *Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji.* WNT, Warszawa, 1977.

[7] Bezdek J.: *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms.* Plenum Press, New York, 1981.

[8] Będkowski L.: *Elementy diagnostyki technicznej.* WAT, Warszawa, 1991.

[9] CARL SCHENCK: *Methods, Applications and Solutions of Conventional and Vibration-Diagnostic Condition Monitoring of Turbo-Sets in Power Stations and Industrial Plants.* SCHENCK, D-64273 Darnstadt, 1995.

[10] Cempel Cz.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn.* PWN, Warszawa, 1982.

[11] Cempel Cz.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn.* Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Poznań, 1989.

[12] Chen C.H.: *Theoretical comparision of a class of feature selection criteria in pattern recognition.* IEEE Trans. Comp., str. 1054–1056, 1971.

[13] Cholewa A.: *Reprezentacja cech sygnałów diagnostycznych w systemie baz danych MIMOSA.* II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna: Diagnostyka Procesów Przemysłowych, Łagów, 1997.

[14] Cholewa W.: *Metoda diagnozowania maszyn z zastosowaniem zbiorów rozmytych.* Zeszyt Naukowy Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1983. Mechanika 764.

[15] Cholewa W.: *Diagnostics and artificial intelligence.* Metody i techniki diagnostyki technicznej. Korbicz J.(red), str. 7–15, Zielona Góra, 1995. Lubuskie Towarzystwo Naukowe.

[16] Cholewa W.: *Uncertain decision tables as a tool for knowledge acquisition.* Proceedings of the 2nd International Workshop on Learning in Intelligent Manufacturing Systems, str. 62–70, Budapest, Hungary, 1995.

[17] Cholewa W.: *Unilateral diagnostic models.* Proceedings of the 2nd International Conference on Acoustic and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, tom 2, str. 805–815, Senlis, France, 1995.

[18] Cholewa W.: *Dynamiczne systemy doradcze w diagnostyce technicznej.* Kongres Diagnostyki Technicznej, str. 57–84, Gdańsk, 1996.

[19] Cholewa W.: *System DT200-1. Założenia projektowe.* Raport wewnętrzny DT6A001, PBZ-038-06, KPKM, Gliwice, 1996.

[20] Cholewa W.: *Real-time expert systems for technical diagnostics.* Proceedings of the 15th IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics, tom 6, str. 715–720, Berlin, Germany, 1997.

[21] Cholewa W.: *Metody i techniki sztucznej inteligencji w diagnostyce technicznej.* IV Krajowa Konferencja: Diagnostyka Techniczna Urządzeń I Systemów, DIAG'98, tom 1, str. 49–58, Szczecin-Międzyzdroje-Ystad, 1998.

[22] Cholewa W.: *Tablice ogłoszeń w diagnostycznych systemach doradczych.* Pomiary, Automaty, Kontrola, 4:123–128, 1998.

[23] Cholewa W.: *Tablica ogłoszeń DT4D150.* Raport wewnętrzny DT4D150, PBZ-038-06, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gliwice, 1999.

[24] Cholewa W.: *Bazy danych w diagostyce technicznej.* II Międzynarodowy Kongres Diagnostyki Technicznej *Diagnostyka 2000*, str. 156–164, Warszawa, 2000.

[25] Cholewa W.: *Dynamiczne systemy doradcze.* Methods of Artificial Intelligence in Mechanics and Mechanical Engineering, str. 37–54, Gliwice, 2000.

[26] Cholewa W., Cholewa A.: *Baza danych DT4D111. Struktura logiczna.* Raport wewnętrzny DT6D236, PBZ-038-06, KPKM , Gliwice, 1998.

[27] Cholewa W., Czogała E.: *Podstawy systemów doradczych.* Instytut biocybernetyki i nioinżynierii, Polska Akademia Nauk PAN, Warszawa, 1989.

[28] Cholewa W., Kaźmierczak J.: *Monitorowanie stanu maszyn - Przetwarzanie sygnałów.* Skrypty Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1992.

[29] Cholewa W., Kiciński J. (red.): *Daignostyka techniczna. Odwrotne modele diagnostyczne.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1997.

[30] Cholewa W., Kiciński J.: *Odwrotne modele diagnostyczne. Monografia.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1997.

[31] Cholewa W., Kiciński J., Redakcja pracy zbiorowej: *DT200-1. System diagnostyczny dla turbozespołów energetycznych o mocy 200MW.* KPKM, IMP PAN, Gdańsk, listopad 1998. Projekt Badawczy Zamawiany PBZ 038-06.

[32] Cholewa W., Moczulski W.: *Diagnostyka techniczna maszyn. Pomiary i analiza sygnałów.* Skrypt Politechniki Śląskiej nr 1758, Gliwice, 1993.

[33] Cholewa W., Moczulski W., Chrzanowski P., i inni: *Odwracanie modeli maszyn wirnikowych w celu pozyskiwania relacji diagnostycznych.* KPKM, Gliwice, 1995.

[34] Cholewa W., Pedrycz W.: *Systemy doradcze.* Skrypt Politechniki Ślaskiej nr 1447, Gliwice, 1987.

[35] Cholewa W., White M. F.: *Inverse vibration modelling for diagnosis of unbalance in machinery.* Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics, str. 503–506, Trondheim, Norway, 1995.

[36] Chrzanowski P.: *Oceny jakościowe funkcyjnych cech sygnałów diagnostycznych.* Kongres diagnostyki technicznej (KDT'96), Gdańsk, 1996.

[37] Chrzanowski P.: *Metody definiowania klas wartości cech sygnałów daiagnostycznych.* II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Diagnostyka Procesów Przemysłowych, Łagów, 1997.

[38] Chrzanowski P.: *Program DT3D220. Import danych z układu DT2B100.* Raport wewnętrzny RMT6455, PBZ-038-06, KPKM, Gliwice, 1998.

[39] Chrzanowski P.: *Przybliżone klasy wartości cech sygnałów diagnostycznych.* III Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Diagnostyka Procesów Przemysłowych, Jurata k/Gdańska, 1998.

[40] Chrzanowski P.: *Ograniczenie stopnia szczegółowości wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych.* IV Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Diagnostyka Procesów Przemysłowych, Kazimierz Dolny, 1999.

[41] Chrzanowski P.: *Ograniczenie wykresów wartości cech dla potrzeb diagnostycznych systemów doradczych.* Methods of Artificial Intelligence in Mechanics and Mechanical Engineering, Gliwice, 2000.

[42] Czech M., Piwek B., Szwabowski W., Werewka J.: *Dokumentacja oprogramowania DT3B100. Dokumentacja użytkownika.* PHU ControlSoft, Kraków, 1997.

[43] Date C.J.: *Wprowadzenie do baz danych.* WNT, Warszawa, 1981.

[44] Dietrych J.: *System i konstrukcja.* WNT, Warszawa, 1985.

[45] Drozdowski A.: *Wstęp do kompresji danych.* WNT, Warszawa, 1998.

[46] Dubois D., Prade H.: *Fuzzy sets and systems.* Academic Press, New York, 1980.

[47] Duda R.O., Hart P.E.: *Pattern classification and scene analysis.* J. Wiley and Sons, New York, 1973.

[48] Fahrmeir L., Hamerle A.: *Multivariate statistische verfahren.* Berlin, Germany, 1984.

[49] Fidali M.: *Metody łącznej analizy sygnałów w wielokanałowych układach diagnozujących dla maszyn wirnikowych.* IV Krajowa Konferencja Naukowo - Techniczna: Diagnostyka Procesów Przemysłowych, Kazimierz Dolny, 1999.

[50] Gałka T.: *Określenie granicznych poziomów drgań w turbinach parowych.* PhD thesis, Warszawa, 1997.

[51] Gass S.I.: *Programowanie liniowe.* PWN, Warszawa, 1976.

[52] Hartigan J. A.: *Clustering algorithms.* Wiley, New York, 1975.

[53] International Vocabulary of Basic, General Terms in Metrology. MIPM, IEC, ISO, OIML, Geneva, 1984.

[54] Jajuga K.: *Statystyczna analiza wielowymiarowa.* Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1983.

[55] Jajuga K.: *Statystyczna teoria rozpoznawania obrazów.* Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1990.

[56] Kacprzyk J.: *Zbiory rozmyte w analizie systemowej.* PWN, Warszawa, 1986.

[57] Kiciński J.: *Symulacja komputerowa w diagnostyce inteligentnej.* Przegląd Mechaniczny, 8, 1996.

[58] Kiciński J., Drozdowski R., Materny P.: *The non-linear analysis of the effect of support construction properties on the dynamic properties of multi-supports systems.* Journal of Sound and Vibration, 1998.

[59] Kiciński J., M. Krawczuk: *Algorytm i system programów komputerowych MESWIR do analizy drgań giętnych swobodnych i wymuszonych ułożyskowanych wirników turbozespołów energetycznych.* IMP PAN, Gdańsk, 1990.

[60] Kiciński J., Materny P., Drozdowski R., Markiewicz A.: *Diagnostic relations acquisition by means of simulations.* Instytut Maszyn Przepływowych, PAN, Gdańsk, 1995.

[61] Kittler J., Young P.C.: *A new approach to eadture selection based on Karhunen-Love expresion, Pattern Recogniotion.* Proceedings of ASME Vibration Conference, tom 5, str. 335–352, 1973.

[62] Klimek A.: *Metody doskonalenia odwrotnych modeli diagnostycznych.* Politechnika Śląska. Mechanika z.134, Gliwice, 1999.

[63] Klir G.J., (red.): *Ogólna teoria systemów.* Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1976.

[64] Korbicz J.: *Metody rozpoznawania obrazów w diagnostyce procesów przemysłowych.* Krajowa Konferencja Naukowo Techniczna. Diagnostyka Procesów Przemysłowych, Jurata k/Gdańska, 1998.

[65] Kurowicz M.: *Metoda badania wpływu cech geometrycznych kół zębatych na rozkład obciążenia wzdłuż odcinka przyporu.* Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice, 1979.

[66] Maniak P.: *Badanie przydatności metod indukcyjnych do pozyskiwania wiedzy projektowej.* Praca doktorska. Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska, Gliwice, 1999.

[67] Microsoft Corporation: *Microsoft SQL Server 6.5 Books OnLine*, 1992–1996.

[68] Microsoft Corporation: *Microsoft Visual C++ 4.0 - Language Manual*, 1994–1995.

[69] MIMOSA Common Relational Information Schema (CRIS). http://www.mimosa.org.

[70] MIMOSA for Machine Condition Monitoring Databases: *CORE Support Requirements.* http://www.hsb.com./mimosa.

[71] Moczulski W.: *Inductive learning in design: a method and case study concerning design of antifriction bearing systems.* John Wiley and Sons, 1997.

[72] Moczulski W.: *Metody pozyskiwania wiedzy dla potrzeb diagnostyki maszyn. Monografia.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1997.

[73] Moczulski W.: *Pozyskiwanie wiedzy deklaratywnej i proceduralnej.* Methods of Artificial Intelligence in Mechanics and Mechanical Engineering, str. 55–74, Gliwice, 2000.

[74] Morel J.: *Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego.* Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Warszawa, 1992.

[75] Morrison D.F.: *Wielowymiarowa analiza statystyczna.* Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1990.

[76] Orłowski Z.: *Relacje diagnostyczne wybranych turbozespołów energetycznych.* Ogólnopolskie Seminarium nt. Wibroakustyki Turbozespołów Energetycznych, str. 115–139, 1994.

[77] Orłowski Z.: *Eksperymentalne relacje diagnostyczne oraz graniczne wartości cech sygnału turbin dużej mocy.* III Krajowa Konferencja. Problemy Badawcze Energetyki Cieplnej, 1997.

[78] Orłowski Z., Gałka T.: *Experimental estimation of vibrational symptom limit values for large steam turbines.* Diagnostics of Rotating Machines in Power Plants. Proceedings of the CISM/IFToMM Symposium, str. 321–330, 1994.

[79] Orłowski Z., Gałka T.: *Statistical methods of vibrational symptom limit value determination for steam turbines.* Proceedings of COMADEM'94, str. 272–279, 1994.

[80] Pająk A.: *Kompresja plików multimedialnych.* Enter, 2/98.

[81] Pavlidis T.: *Grafika i przetwarzanie obrazów.* WNT, Warszawa, 1987.

[82] $PRISM^4Surveyor^{TM}$. SKF Condition Monitoring, http://www.skfcm.com, 1999.

[83] Skarbek W.: *Multimedia - Algorytmy i Standardy Kompresji.* Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1998.

[84] Sobczak W., Malina W.: *Metody selekcji i redukcji informacji.* WNT, Warszawa, 1985.

[85] Sojka A., Chrzanowski P.: *Program DT3D219. Import danych z układu WDPF.* Raport wewnętrzny RMT6454, PBZ-038-06, KPKM, Gliwice, 1998.

[86] Statistica. User's manual. StatSoft, Tulsa, 1994.

[87] Szabatin J.: *Podstawy teorii sygnałów.* WKiŁ, 1982.

[88] Thomas R.: *Quantitative methods for Business studies.* Prentice Hall, 1997.

[89] Volk W.: *Statystyka stosowana dla inżynierów.* Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1973.

[90] Wilimowska Z.: *Selekcja cech w rozpoznawaniu obrazów.* Politechnika Wrocławska, Wrocław, 1976.

[91] Wyleżoł M.: *Metody pozyskiwania procedur i relacji diagnostycznych od specjalistów w dziedzinie eksploatacji maszyn.* Praca doktorska. Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska, Gliwice, 2000.

[92] Wysogląd B.: *Zastosowanie dyskretnej transformacji Fouriera do analizy sygnałów dwuwymiarowych opisujących trajektorie ruchu środka czopa w łożysku ślizgowym.* III Intern. Conf. Achievements in Mechanical and Material Engineering, T I:389–396, 1994.

[93] Wysogląd B.: *Metody reprezentacji drgań wałów maszyn wirnikowych w diagnostycznych bazach danych.* Mechanika 126. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1996.

[94] York K.: *Kompresja dźwięku metodą kwantyzacji delt.* Software, 9/95.

[95] Zadeh L. A.: *The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems.* Elsevier Science Publishers, North-Holland, 1983.

[96] Zadrąg J.: *Kompresja danych.* Enter, 3/94–1/95.

[97] *Zastosowanie dwukierunkowego pomiaru przemieszczeń względnych wałów w diagnostyce turbozespołów.* IMiPKM, Gliwice, 1989-1991.

[98] Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn.* Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz, 1996.

Metody jakościowej oceny cech sygnałów diagnostycznych

Streszczenie

Problem wspomagania procesu wnioskowania o stanie maszyny oraz podejmowania decyzji o jej dalszej eksploatacji jest ciągle rozwijany. Statyczne i dynamiczne systemy doradcze są przykładami narzędzi wspomagających proces wnioskowania. Statyczne systemy doradcze charakteryzują się tym, iż działają w stałym otoczeniu. Jednakże potrzeba stosowania systemów doradczych do wspomagania procesu wnioskowania o stanie złożonych obiektów, jakimi są turbozespoły, wymaga uwzględniania ciągle zmieniających się danych. Dla potrzeb systemów ciągłego monitorowania opracowywane są układy pomiarowe, które realizują wiele działań. Układy te między innymi wyznaczają oceny punktowe cech sygnałów, dla których przeprowadzana jest jakościowa ocena. Złożoność obserwowanego obiektu powoduje, że liczba danych dostarczanych przez te układy pomiarowe jest duża, często sięga kilku tysięcy. Względy optymalizacyjne baz danych oraz baz wiedzy dynamicznych systemów doradczych zmuszają do opracowania metod redukcji zbioru danych.

Celem badań opisanych w tej pracy było opracowanie takiej metody postępowania, która umożliwi wyraźne ograniczenie liczby gromadzonych danych, bez pogorszenia ocen jakościowych wyznaczanych na podstawie tych danych. Ograniczenie wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych może być realizowane dla zbioru danych zmieniających się dynamicznie (*on-line*) oraz dla zbioru danych historycznych (*off-line*). Metody ograniczania wykresów wartości cech sygnałów dla potrzeb dynamicznych systemów doradczych podzielono na metody ograniczania liczby cech, ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech oraz liczby elementów wykresów wartości cech. Jako przykład metody ograniczania liczby cech opisano metodę reprezentacji parametrycznej, która umożliwia dalsze ograniczanie wartości w wielowymiarowej przestrzeni cech poprzez ograniczenie liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech oraz ograniczanie liczby elementów wykresów wartości cech.

W celu ograniczania liczby elementów zbioru rozróżnianych wartości cech opracowano metodę *kwantowania z histerezą*. Głównym przeznaczeniem tej metody jest ograniczanie szumów kwantowania występujących na graniach pasm kwantowania wtedy, gdy kwantowane są wartości cech sygnałów. Ponadto w celu ograniczania *off-line*, a także określenia klasy jakościowej reprezentowanej przez wartości dokładne, opisano reprezentację przybliżoną, w szczególności z zastosowaniem liczb rozmytych.

Opisano metodę sklejania dla potrzeb ograniczania liczby elementów wykresów wartości cech sygnałów diagnostycznych.

Dla opracowanej metody kwantowania z histerezą zaproponowano metodę optymalizacji szerokości pasma kwantowania. Metoda ta oparta jest na analizie statystycznej. Przedstawiono ilościowe i jakościowe miary oceny ograniczonych wykresów wartości cech.

Zweryfikowano metodę kwantowania z histerezą wraz z równoczesnym sklejaniem elementów, przeprowadzając badania obiektu rzeczywistego, jakim jest turbozespół nr 7, zainstalowany w Elektrowni Kozienice S.A.. Na podstawie uzyskanych wyników potwierdzono słuszność zastosowania wstępnego ograniczenia wykresów wartości cech w celu dokonania ich oceny jakościowej.
Słowa i zwroty kluczowe: diagnostyka maszyn, systemy doradcze, systemy monitorowania, redukcja danych, diagnostyczne bazy danych, ocena jakościowa

Methods for qualitative estimation of diagnostic signals

Abstract

Computer aided machinery state reasoning process and machinery management decision making tools have been under constant development nowadays. Static and dynamic expert systems are two examples of such tools. Static systems operate in a steady state environment. There is, however, a need towards developing expert systems for complex objects (e.g. turbine/generator sets) state reasoning processes. In that type of working environment the systems need to take account for data varying in time. Multi-task measurement tools have been under development for that purpose. The discrete parameters the tools identify are then subject to qualitative estimation. Due to the object complexity the number of input data records is huge on the order of a few thousands. Such numbers enforce the use of data optimization and data set reduction techniques. Problems due to such data sets acquisition contributed to development of data pre-processing or pre-conditioning tools.

The purpose of this thesis was to develop an approach to enable measurement data set reduction with no apparent degradation on the accuracy of estimates. In this study the author claims that methods for reduction values of features are required for qualitative estimation of diagnostic signals. The data reduction can be either *on-line* or *off-line*; the latter being used for pre-conditioned data. The methods can be divided into methods for reduction of features, methods for reduction of measured data sets, and time-domain methods. As an example of the features reduction a method for parametric representation and classification was presented in this study. As a result of such a method application, the reduction of values in a multi-dimensional feature space is enabled by a reduction of the number of divergent values.

In the thesis methods for data set reduction by sampling and *sampling with hysteresis* were described, respectively. The main task of this method is the reduction of quantization noise on a class value limit. Also, for the purpose of *off-line* reduction and determining qualitative classes represented by exact values a fuzzy logic based approximate data representation was described there. The fuzzy-logic based data representation is no more than a way of parametric representation. In addition to that, data reduction time domain methods were explained too. They are based on the principle of bonding adjacent values. Also, a method for a tolerable degree fit was proposed and analyzed. The method is based upon statistical analysis and correlation analysis.

Both quantitative and qualitative measures for estimation of reduction feature values were illustrated. In order to verify and validate the algorithm a variety of test examples was described and shown. Within the present framework real-life data coming from measurements of the turbine/generator set #7 at the Kozienice Power Plant were illustrated and explained. The acquired results have proved the pre-conditioning is crucial in reduction feature values for the purpose of qualitative estimation.

Key words and phrases: condition monitoring of machinery, expert system, monitoring systems, data set reduction, qualitative estimation, diagnostic databases

Spis rysunków

1.1 Główne elementy systemu doradczego 15
1.2 Dyskretne widmo amplitudowe jako przykład cechy punktowej wielowymiarowej . 23
1.3 Przykład definicji wartości przybliżonej *około* 30^oC 23
1.4 Graficzna reprezentacja wykresu wartości cechy T(t) [°C] 24
1.5 Wzorzec przedziałów, określony przez wartości graniczne 31
1.6 Obszary położeń linii osi wałów w łożyskach hydrodynamicznych turbiny 31
1.7 Przykład ograniczenia cechy funkcyjnej w zbiorze wartości 32

2.1 Dynamiczne ograniczanie wykresów wartości cech sygnałów 38
2.2 Ograniczenie zbioru uwzględnianych cech 40
2.3 Przykład ciągu próbek w czasie, drgań bezwzględnych obudowy łożyska 42
2.4 Przykładowy histogram przebiegu czasowego drgań bezwzględnych obudowy łożyska 43
2.5 Przykładowa trajektoria ruchu środka czopa maszyny wirnikowej 44
2.6 Przykład dyskretnego widma amplitudowego prędkości drgań bezwzględnych pokrywy łożyska 47
2.7 Skalarne funkcje kwantujące 49
2.8 Funkcja kwantowania z histerezą 51
2.9 Przykład porównujący metodę kwantowania względem metody kwantowania z histerezą 52
2.10 Skalowanie wartości cech sygnałów 55
2.11 Funkcja przynależności liczby rozmytej *około 5*, $A = (5, 2, 2)$ 60
2.12 Przykładowa rodzina liczb rozmytych 60
2.13 Przykład sklejania wartości cech 63

3.1 Przykład wpływu szerokości pasma kwantowania na wariancję wykresu wartości cechy 67
3.2 Przykład wpływu szerokości pasma kwantowania z histerezą na poziom istotności testu χ^2 68
3.3 Przykład wpływu szerokości pasma kwantowania na wartości współczynnika korelacji 71
3.4 Przykład wpływu szerokości pasma kwantowania na stopień ograniczenia wykresu wartości cechy 75

4.1 Struktura systemu DT-200 80

4.2 Schemat działania programu DT3D220 81
4.3 Przykładowe widmo dyskretne wraz z wartościami granicznymi 84
4.4 Wykres wartości momentu centralnego drugiego rzędu dla prędkości drgań bezwzględnych 86
4.5 Wpływ szerokości pasma kwantowania na *średnią* dla DBPL5H.M2 87
4.6 Wpływ szerokości pasma kwantowania na *medianę* dla DBPL5H.M2 87
4.7 Wpływ szerokości pasma kwantowania na *odchylenie standardowe* dla DBPL5H.M2 88
4.8 Wpływ szerokości pasma kwantowania na *wariancję* dla DBPL5H.M2 89
4.9 Wpływ szerokości pasma kwantowania na *skośność* dla DBPL5H.M2 89
4.10 Wpływ szerokości pasma kwantowania na *kurtozę* dla DBPL5H.M2 90
4.11 Wpływ szerokości pasma kwantowania na *moment centralny trzeciego rzędu* dla DBPL5H.M2 91
4.12 Wpływ szerokości pasma kwantowania na *moment centralny czwartego rzędu* dla DBPL5H.M2 92
4.13 Wpływ szerokości pasma kwantowania na *korelację wzajemną* dla DBPL5H.M2 . 93
4.14 Wpływ szerokości pasma kwantowania na wyniki testu χ^2 dla DBPL5H.M2 . . . 94
4.15 Wpływ szerokości pasma kwantowania na *miarę stopnia ograniczenia MSO* dla DBPL5H.M2 95
4.16 Wykresy wartości amplitud składowych widma prędkości drgań bezwzględnych . 97
4.17 Wykresy wartości składowych stałych przemieszczeń względnych wału turbiny w łożyskach nr 1 do 3 101
4.18 Wykresy wartości składowych stałych przemieszczeń względnych wału turbiny w łożyskach nr 4 do 6 102
4.19 Wykresy wartości składowych stałych przemieszczeń względnych wału turbiny w łożysku nr 7 103

Spis tabel

1.1 Wykres wartości cechy T(t) 24
1.2 Przykład oceny kierunku zmian wybranej wartości cechy punktowej jednowymiarowej 30

2.1 Podział na klasy przybliżonych wartości 54
2.2 Definicja klas przybliżoych wartości cech 55
2.3 Wykaz norm i zaleceń stosowanych do oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych na podstawie drgań bezwzględnych obudowy łożyska 57
2.4 Wykaz norm i zaleceń stosowanych do oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych na podstawie drgań względnych czopa wału w łożysku 57

3.1 Graniczne wartości współczynnika korelacji 71

4.1 Wartości graniczne amplitud składowych harmonicznych i subharmonicznych drgań bezwzględnych 84
4.2 Podstawowe statystyki dla DBPL5H.M2 94
4.3 Wyniki wyznaczonej dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania wykresu DBPL5H.M2 95
4.4 Wyniki wyznaczonej dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania z histerezą wykresu DBPL5H.M2 95
4.5 Podstawowe statystyki dla grupy sygnałów DBPL4V.An 98
4.6 Wyniki wyznaczonej dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania dla DBPL4V.An 98
4.7 Wyniki wyznaczonej dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania z histerezą dla DBPL4V.An 98
4.8 Podstawowe statystyki dla składowych stałych przemieszczeń względnych wału turbiny 99
4.9 Wyniki poszukiwania dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania dla składowych stałych 100
4.10 Wyniki poszukiwania dopuszczalnej szerokości pasma kwantowania z histerezą dla składowych stałych 104

Indeks

analiza zmiennosci, 65

błąd klasyfikacji, 74
baza danych, 16
baza wiedzy, 14

cecha, 21
cecha funkcyjna, 23
cecha jakościowa, 22
cecha punktowa wielowymiarowa, 22
cechy ilościowe, 22
cechy punktowe, 22
cechy punktowe wielowymiarowe, 22
czas makro, 13
czas mikro, 13

diagnostyka techniczna, 13
dynamiczne systemy doradcze, 15

klasyfikacja, 28, 47
korelacja, 70
kwantowanie, 48
kwantowanie skalarne, 48
kwantowanie z histerezą, 50

liczby rozmyte, 58

model hierarchiczny, 17
model relacyjny, 18
model sieciowy, 18

obraz cechy, 25

przybliżona wartość, 52

sklejanie, 62
stan, 14
statyczne systemy doradcze, 15
stopień ograniczenia, 75
sygnał, 13
system doradczy, 14
systemy baz danych, 18

test chi^2, 67
test z, 68

wartość przybliżona, 23
wartości graniczne, 30
wykres wartości cechy, 24

zmienna lingwistyczna, 27
zmienna rozmyta, 26