

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Гончаров Артем Андреевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВИБРОДИАГНОСТИКИ  
ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ**

Специальность 09.04.01 —  
«Информатика и вычислительная техника»

Диссертация на соискание учёной степени  
магистра

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Гай Василий Евгеньевич

Нижний Новгород — 2016

# Оглавление

Стр.

Введение . . . . . 4

## Глава 1. Обзор существующих методов вибродиагностики.

Постановка задачи . . . . . 7

1.1 Структура систем вибродиагностики . . . . . 7

1.2 Обзор существующих методов вибродиагностики подшипников  
качения . . . . . 7

1.2.1 Метод на основе вейвлет-преобразования и нечеткого вывода 8

1.2.2 Метод на основе метода эмпирических мод и  
авторегрессионной модели . . . . . 10

1.2.3 Метод на основе локального среднего значения и  
частотно-временного анализа . . . . . 14

1.2.4 Метод на основе Мел-частотных кепстральных  
коэффициентов . . . . . 18

1.3 Выводы по главе 1 . . . . . 20

## Глава 2. Информационная модель классификации

вибрационных сигналов . . . . . 22

2.1 Теория активного восприятия . . . . . 22

2.2 Реализация системы вибродиагностики с использованием теории  
активного восприятия . . . . . 30

2.2.1 Предварительная обработка . . . . . 30

2.2.2 Формирование системы признаков . . . . . 30

2.2.3 Классификация . . . . . 34

2.3 Выводы по главе 2 . . . . . 37

## Глава 3. Вычислительный эксперимент . . . . . 38

3.1 Эксперимент . . . . . 43

3.2 Выводы по главе 3 . . . . . 48

Заключение . . . . . 49

Список сокращений и условных обозначений . . . . . 50

Список литературы . . . . . 51

Подп. и дата	2.1	Теория активного восприятия . . . . .	22				
	2.2	Реализация системы вибродиагностики с использованием теории активного восприятия . . . . .	30				
	2.2.1	Предварительная обработка . . . . .	30				
	2.2.2	Формирование системы признаков . . . . .	30				
	2.2.3	Классификация . . . . .	34				
Взам. инв. №	2.3	Выводы по главе 2 . . . . .	37				
	Глава 3. Вычислительный эксперимент . . . . .		38				
	3.1	Эксперимент . . . . .	43				
	3.2	Выводы по главе 3 . . . . .	48				
	Заключение . . . . .		49				
Инв. № дубл.	Список сокращений и условных обозначений . . . . .		50				
	Список литературы . . . . .		51				
Подп. и дата							
Инв. № подл	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)						
	Изм.	№ докум.	Подп. Дата				
	Разраб.	Гончаров А. А.					
	Пров.	Гай В. Е.					
	Т. контр.						
Инв. № подл	Н. контр.						
	Утв.	Кондратьев В. В					
	Методы и алгоритмы вибродиагностики подшипников качения			Лит	Лист	Листов	
					У	3	52
				НГТУ им. Р. Е. Алексеева			

## Введение

Подшипник качения – не самый редкий сборочный узел, использующийся для удержания подвижных конструкций. Данный вид крепления используется достаточно давно, однако по статистике [1] вышедших из строя подшипников, только 10% деградировали вследствие естественного износа, остальные – по причине неправильной установки или эксплуатации. Вибродиагностика позволяет выявлять следующие дефекты подшипников качения:

- дефекты внутренней и внешней дорожек;
- дефекты элементов качения;
- дефекты сепаратора;
- дефекты смазки.

На данный момент существует множество методов вибродиагностики подшипников качения, однако они имеют ряд проблем:

- проблема формирования исходного описания;
- проблема формирования системы признаков;
- проблема принятия решения в условиях априорной неопределенности;
- проблема устойчивости метода к появлению шумов в исследуемом сигнале;

Таким образом, исследование в данной работе направлено на решение описанных проблем.

### Цель работы и задачи исследования

Целью данной работы является исследование существующих методов вибродиагностики состояний подшипников качения, разработка собственного метода вибродиагностики, а также выполнение эксперимента в целях проверки работоспособности разработанного алгоритма.

### Объект исследования

В представленной работе объектом исследования является сигнал, полученный с датчиков (акселерометров).

### Предмет исследования

Предметом исследования являются методы диагностики подшипников качения по вибросигналу.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата							
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)	Лист
											4

## Методы исследования

В качестве методов исследования использовались:

- методы цифровой обработки сигналов;
- теория активного восприятия;
- методы машинного обучения.

## Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения:

- разработанная система признаков;
- результаты экспериментального исследования.

## Научная новизна

Научная новизна работы состоит в разработке новой системы признаков на основе матрицы переходов.

## Практическая ценность работы

Практическая ценность работы состоит в разработке программного комплекса по анализу вибросигнала по разработанному методу диагностики подшипников качения. Данная система может быть использована для внедрения вибродиагностирования на различных производствах, использующих подшипники качения в оборудовании.

## Реализация результатов работы

По результатам проведенных исследований были опубликованы тезисы на XXI международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ-2015 [2], а также зарегистрирована программа для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам [3].

## Апробация работы

Апробация данной работы была произведена в рамках выступления на XXI международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ-2015.

## Обоснованность и достоверность

Достоверность и обоснованность данной работы подтверждается корректным использованием современных подходов к цифровой обработке сигналов и проведению вычислительных экспериментов. Полученные результаты исследования подтверждаются экспериментальными данными. Достоверность данной работы также подтверждает представленный анализ современных методов вибродиагностики подшипников качения, а тестовые данные, использованные для про-

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата						
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)					Лист
										5

ведения вычислительных экспериментов, являются широко используемыми в научных работах по аналогичной тематике, что также подтверждает достоверность полученных результатов.

### Публикации

В процессе работы над диссертацией были опубликованы тезисы на XXI международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ-2015 [2] и зарегистрирована программа для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам [3].

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения. Полный объём диссертации составляет 52 страницы с 17 рисунками и 13 таблицами. Список литературы содержит 25 наименований.

Инв. № подл	Подп. и дата				Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)			Лист
								6

# Глава 1. Обзор существующих методов вибродиагностики.

## Постановка задачи

### 1.1 Структура систем вибродиагностики

Современные алгоритмы вибродиагностики состоят из 3-х основных этапов [4]:

1. предварительная обработка сигнала;
2. формирование системы признаков;
3. классификация сигнала на основе системы признаков.

Предварительная обработка сигнала является первым шагом в решении поставленной задачи. На данном шаге создается представление сигнала, необходимое для дальнейшей обработки. Целью данного этапа является представление сигнала в удобной форме для последующего анализа.

Наиболее сложной задачей является создание системы признаков, опираясь на которую можно определить существование и характер повреждения подшипника с приемлемой погрешностью. Данная задача является основной в современных алгоритмах вибродиагностики подшипников качения. Искомая система признаков должна быть устойчива к появлению шумов в сигнале.

Третий этап является похожим во множестве алгоритмов и в основном рассматривается как решенный шаг. Данный этап осуществляется путем использования существующих классификаторов, вариации которых могут влиять на точность конечных результатов.

### 1.2 Обзор существующих методов вибродиагностики подшипников качения

Наиболее важным этапом является создание системы признаков. Современные методы вибродиагностики можно разделить на несколько видов, которые выделяют в обрабатываемом сигнале следующие характеристики

- частотные;
- частотно-временные;

Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Инв. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)	Лист
						7

— временные.

Методы вибродиагностики основанные на использовании частотных характеристик сигнала, обычно анализируют высокочастотные участки и выполняют поиск повторений данных участков. Решение задачи с помощью данного подхода усложняет тот факт, что периодичность сигнала может быть слабо выраженной. Главным недостатком методов использующую данный подход является склонность к усреднению наблюдаемых характеристик, что приводит к снижению эффективности при появлении шума в наблюдаемом сигнале. Наиболее известными и популярными являются:

- высокочастотный резонансный метод (HFRT) [5];
- метод анализа огибающей (envelope analysis) [6].

Методы вибродиагностики использующие в качестве признакового описания частотно-временные характеристики устраняют недостатки частотных методов, путем наблюдения изменения частотных характеристик сигнала во времени. Типовыми примерами такого анализа являются:

- оконное преобразование Фурье (STFT) [7];
- вейвлет-преобразование (WT) [8];
- преобразование Вигнера—Вилла (WVD) [9].

Методы использующие временные характеристики сигнала часто вводят характеризующие параметры, например такие как пиковый уровень, среднеквадратичное отклонение значений, подсчет ударного импульса, скользящее среднее значение и многие другие [10].

### 1.2.1 Метод на основе вейвлет-преобразования и нечеткого вывода

В данном методе для выявления и классификации повреждений подшипников качения используется вейвлет преобразование и нечеткая нейро классификация [8]. Вейвлет преобразование используется для предварительной обработки сигнала и для создания вектора признаков. Адаптивная нечеткая нейронная система используется в качестве классификатора.

Инв. № подл	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Лист 8
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)

## Краткий обзор вейвлет-преобразования

Вейвлет-преобразование определяется как интеграл сигнала  $s(t)$  умноженного на масштабированную и сдвинутую версию базовой вейвлет функции  $\psi(t)$  — вещественной функции, которая удовлетворяет критерию приемлемости преобразования Фурье:

$$C(a,b) = \int_R s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad a \in R^+ - \{0\}, \quad b \in R, \quad (1.1)$$

где  $a$  — так называемый коэффициент масштабирования,  $b$  — является параметром локализации во времени. Оба параметра  $a$  и  $b$  могут быть как непрерывными, так и дискретными переменными. Умножив каждый коэффициент на соответствующий масштабируемый и сдвинутый вейвлет, мы получаем вейвлеты составляющие исходный сигнал, тем самым выводим формулу базовой вейвлет функции:

$$s(t) = \frac{1}{K_\psi} \int_R \int_{R^+} C(a,b) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da}{a^2} db. \quad (1.2)$$

Используя функцию базового вейвлета (1.1), масштабируя её и сдвигая, можно получить представление сигнала в любой момент времени.

На практике, разложение можно определить итерационно, таким образом, что сигнал раскладывается на множество компонентов с низким разрешением. Данный подход известен как вычисление дерева вейвлет разложений. С помощью реконструирующих фильтров и повышения частоты дискретизации, можно получить составляющие сигнала на каждом уровне разложения.

Чтобы избежать неразрешимых вычислений на каждом уровне разложения при использовании непрерывного вейвлет преобразования, вычисления производятся с помощью дискретного вейвлет преобразования, использование которого при анализе сигнала является более эффективным и точным.

### Вейвлет-анализ и определение признаков

В процессе анализа сигнала, обучение метода происходит на первой половине сигнала, вторая половина используется для анализа, т.е. проверки работы метода. В данном методе, авторами используется вейвлет Добеши для анализа сигнала.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	
ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)					Лист
					9



Для количественной оценки признаков извлеченных из сигнала с помощью вейвлет-разложения авторы используют вектор признаков DWT в виде:

$$v = [v_1, v_2, \dots, v_6]^T \quad (1.3)$$

где элементы определяются формулой 1.4

$$v_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ri}} \quad (1.4)$$

где  $\sigma_i$  — стандартное отклонение  $i$ -го разложения наблюдаемого сигнала, а  $\sigma_{ri}$  — стандартное отклонение  $i$ -го разложения опорного сигнала (эталона).

Созданный DWT вектор используется классификаторами для дальнейшей обработки.

### 1.2.2 Метод на основе метода эмпирических мод и авторегрессионной модели

Данный метод [11] определяет, что использование авторегрессионной модели (АМ) является эффективным подходом для формирования признаков неисправностей подшипников в диагностируемом сигнале. Тип повреждения может быть идентифицирован без создания математической модели и изучения механизма неисправностей системы. Однако, АМ модель может быть применена только к стационарным сигналам, в то время как вибрационный сигнал, полученный во время работы подшипника, не является стационарным. Для решения этой проблемы используется метод эмпирических мод (МЭМ) для предварительной обработки нестационарного сигнала в ряд внутренних колебаний (мод), которые являются стационарными. Соответственно, АМ модель может быть применена к каждой моде, что и рассматривается как вектор признаков. Расстояние Махаланобиса используется для определения состояния и классификации неисправности подшипника.

Инв. № подл	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	<div> <div>ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)</div> <div>Лист</div> <div>10</div> </div>
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	

## МЭМ метод

Метод МЭМ [12] разработан из простого предположения, что любой сигнал состоит из различных простых внутренних колебаний (мод). Каждая линейная или нелинейная мода будет иметь одинаковое количество экстремумов и нулевых пересечений. Каждая мода должна быть независима от других. Таким образом, каждый сигнал может быть разложен в ряд мод, каждая из которых должна удовлетворять следующим условиям:

1. количество экстремумов (и максимумов и минимумов) и количество пересечений нуля не должны отличаться более чем на единицу;
2. среднее значение, которое определяется по двум огибающим — верхней и нижней, должно быть равно нулю.

Любой сигнал  $x(t)$  может быть разложен следующим образом:

1. определить все локальные экстремумы, а затем соединить все локальные максимумы кубической сплайновой линией в качестве верхней огибающей;
2. повторить процедуру для локальных минимумов чтобы определить нижнюю огибающую. Верхняя и нижняя огибающие должны охватывать все данные между собой;
3. среднее значение верхней и нижней огибающих обозначается как  $m_1$ , а разность между сигналом  $x(t)$  и  $m_1$  является первым компонентом  $h_1$ :

$$h_1 = x(t) - m_1;$$

4. если  $h_1$  не является модой, то  $h_1$  рассматривается как исходный сигнал и повторяются пункты 1—3, затем

$$h_{11} = h_1 - m_1$$

После многократного повторения, до  $k$  раз,  $h_{1k}$  становится модой:

$$h_{1k} = h_{1(k-1)} - m_{1k}$$

затем это обозначается как:

$$c_1 = h_{1k}$$

что является первой модой исходного сигнала

Инва. № подл	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата
Инва. № подл	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

5. Отделяя  $c_1$  от  $x(t)$ , получаем:

$$r_1 = x(t) - c_1$$

$r_1$  рассматривается как оригинальный сигнал и вышеописанные процессы повторяются, следовательно может быть получена вторая мода  $c_2$ . Повторяя вышеописанные шаги  $n$  раз можно получить  $n$  мод исходного сигнала. Процесс разложения может быть остановлен, когда  $r_n$  становится монотонной функцией из которой невозможно больше извлечь мод.

На основе вышеописанных шагов можно выделить следующее:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n$$

Каждая мода  $c_1, c_2, \dots$  включает в себя различные диапазоны частот от высокого до низкого и находится в статическом состоянии.

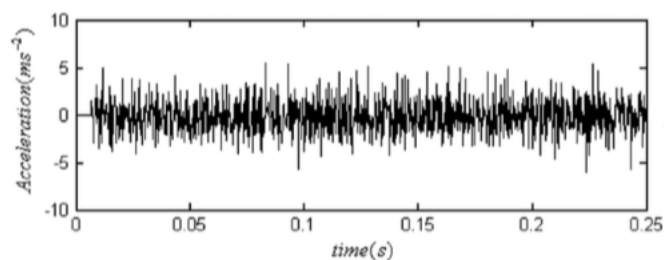


Рисунок 1.1 — Вибрационный сигнал подшипника качения с повреждением наружного кольца.

На рисунке 1.1 показан сигнал, который разложен на 9 мод и остаток  $r_n$ . Моды отображены на рисунке 1.2.

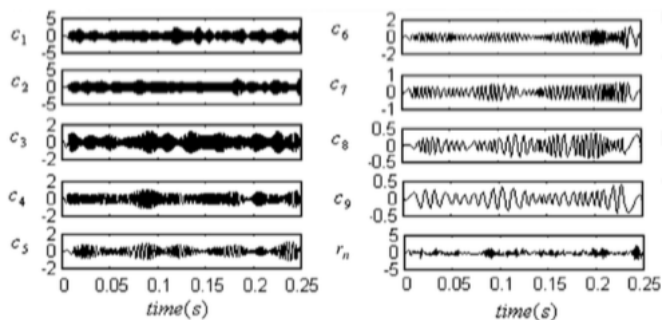


Рисунок 1.2 — Результат декомпозиции вибрационного сигнала подшипника качения, изображенного на рис. 1.1.

Из рисунка 1.2 можно сделать вывод, что каждая мода определяет множитель в конкретный момент времени.

Инв. № подл	Подп. и дата				Лист	
	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)					
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	12	

Инв. № подл	Подп. и дата				Лист	
	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)					
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	12	

0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25

time(s)

Рисунок 1.1 — Вибрационный сигнал подшипника качения с повреждением наружного кольца.

На рисунке 1.1 показан сигнал, который разложен на 9 мод и остаток  $r_n$ . Моды отображены на рисунке 1.2.

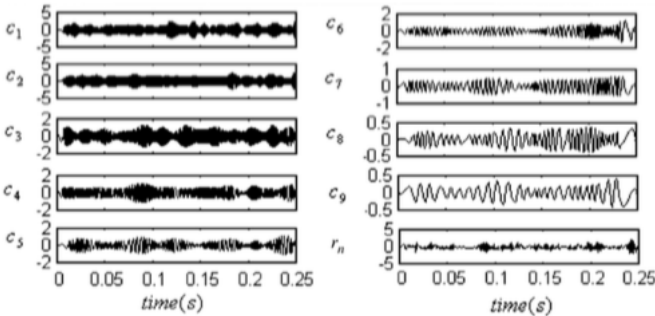


Рисунок 1.2 — Результат декомпозиции вибрационного сигнала подшипника качения, изображенного на рис. 1.1.

Из рисунка 1.2 можно сделать вывод, что каждая мода определяет множитель в конкретный момент времени.

## Метод диагностики подшипников качения на основе МЭМ метода и АМ модели

При применении данного метода предполагается, что вибросигнал подшипника качения  $x(t)$  был разложен с помощью МЭМ на  $n$  мод  $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$ , где каждая мода предоставляет информацию о характеризующем множителе. Таким образом, после применения МЭМ к исходному сигналу  $x(t)$  моды  $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$  могут полностью охарактеризовать  $x(t)$ . Авторегрессионная модель применяется для каждой моды  $c_i$  [13]

$$c_i(t) + \sum_{k=1}^m \phi_{ik} c_i(t-k) = e_i(t),$$

где  $\phi_{ik} (k = 1, 2, \dots, m)$ ,  $m$  — параметр модели и является порядком АМ модели  $AR(m)$   $c_i(t)$  соответственно.  $e_i(t)$  — остаток модели и представляет собой последовательность белых шумов, среднее значение которых равно нулю, а дисперсия  $\sigma_i^2$ . Поскольку параметры  $\phi_{ik}$  могут отражать характеристики вибросигнала подшипника качения, а дисперсия остатка  $\sigma_i^2$  тесно связана с выходными характеристиками системы, то  $\phi_{ik}$  и  $\sigma_i^2$  могут быть использованы в качестве векторов признаков  $A_i = [\phi_{i1}, \phi_{i2}, \dots, \phi_{im}, \sigma_i^2]$  для определения состояния подшипника качения. Таким образом алгоритм включает следующие шаги:

1. Определение сигнала  $x(t)$
2. Получение мод  $c_1, c_2, \dots, c_n$  с помощью МЭМ
3. Применение АМ к модам
4. Получение вектора признаков  $A_i$
5. Вычисление  $M$ – расстояния
6. Классификация характеризующих мод
7. Принятие решения о состоянии подшипника качения

где  $M$ – расстояние, которое вычисляется по следующей формуле:

$$d_{j,i} = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left( \frac{\phi_{x,ik} - \bar{\phi}_{ik}}{D[\phi_i]} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{x,i}^2 - \bar{\sigma}_i^2}{D[\sigma_i^2]} \right)^2},$$

где  $j = 1, 2, 3$  определяет нормальное состояние подшипника, повреждение наружного кольца и повреждение внутреннего кольца соответственно, а  $i = 1, 2, \dots, n$  —  $i$  –й компонент

$$d_i = \sum_{j=1}^n a_j * d_{j,i}$$

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата

где  $a_i$  – положительные числа удовлетворяющие следующему условию:

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1.$$

Сравнивая  $d_1, d_2, d_3$  и выбирая тип повреждения подшипника  $j$  по меньшей мере один параметр соответствует искомому состоянию подшипника. Таким образом определяется состояние и тип повреждения подшипника качения.

### 1.2.3 Метод на основе локального среднего значения и частотно-временного анализа

В методе, описанном в [14] строится осциллограмма и энергетический спектр вибросигнала. Затем находится распределение энергетической плотности сигнала используя непосредственно частотно-временной анализ эмпирических мод и функции произведения (ФП). Набор мод получается путем декомпозиции сигнала с помощью модифицированного метода эмпирических мод рассмотренного в 1.2.2 — ММЭМ. После того как оригинальный сигнал декомпозирован с помощью метода локальных средних значений получается производственная функция. В завершении, в соответствии распределения энергетической плотности сигнала диагностируется повреждение подшипника качения с помощью оконного преобразования Фурье.

#### Принцип декомпозиции ММЭМ

Принцип ММЭМ [15] заключается в использовании гауссового шума, который имеет нормальное распределение значений сигнала. Добавленные шумы компенсируют друг друга, а эмпирические моды остаются в заданных пределах, что значительно снижает шанс смещения мод. Данный процесс определяется как последовательность следующих шагов:

1. Многократное добавление гауссового шума к оригинальному сигналу. Среднее значение шума равно 0, а амплитуда шума находится в диапазоне от 10 до 40 процентов от исходного сигнала.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № инв.	Лист	14
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)		

2. Находится мода  $c_{ij}(t)$  и остаточный член  $r_i(t)$ ,  $c_{ij}(t)$  представляет собой  $j$ -ю моду полученную с помощью МЭМ метода.

$$c_j(t) = \frac{1}{N} \sum_N^i c_{ij}(t)$$

3. Шаги 1 и 2 повторяются  $N$  раз с разными шумами
4. Полученный набор соответствующих средних мод является представлением оригинального сигнала

$$x(t) = \sum_j c_j(t) + r(t)$$

где  $r(t)$  является конечным остаточным членом, который представляет собой среднее отклонение сигнала.

Любой сигнал может быть разложен на несколько мод и остаточный член с помощью ММЭМ.

### Принцип декомпозиции с помощью метода локальных средних значений

Суть метода, описанного в [16] состоит в выделении из исходного сигнала частотной модуляции и огибающую сигнала, перемножение которых дает возможность получить функцию произведения. Для любого сигнала  $x(t)$  процесс разложения выполняется в следующей последовательности:

1. Найти все локальные экстремумы  $n_i$  исходного сигнала и вычислить средние значения всех соседних локальных экстремумов

$$m_i = \frac{n_i + n_{i+1}}{2}$$

Все соседние средние значения  $m_i$  соединяются линией и сглаживаются с помощью метода скользящей средней для получения локальной средней функции  $m_{11}(t)$

2. Вычисление расчетного значения огибающей

$$a_i = \frac{|n_i + n_{i+1}|}{2}$$

Все соседние расчетные значения огибающей  $a_i$  соединяются линией и сглаживаются с помощью метода скользящей средней для получения расчетной огибающей функции  $a_{11}(t)$

Инв. № подл.	Подп. и дата					Лист 15
	Взам. инв. №					
	Инв. № дубл.					
	Подп. и дата					
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)	

3. Отделить локальную среднюю функцию от исходного сигнала

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t)$$

4. Разделить функцию  $h_{11}(t)$  на расчетную огибающую функцию  $a_{11}(t)$

$$s_{11}(t) = \frac{h_{11}(t)}{a_{11}(t)}$$

Для  $s_{11}(t)$  итеративно повторяя предыдущие шаги можно получить расчетную функцию огибающей  $a_{12}(t)$  сигнала  $s_{11}(t)$ , Если  $a_{12}(t)$  не равна 1, это означает, что  $a_{12}(t)$  не является частотной модуляцией исходного сигнала, в противном случае итерационный процесс заканчивается. На практике часто вводится погрешность  $\delta$  и условием прекращения итерирования является следующие неравенство:

$$1 - \delta \leq a_{1n}(t) \leq 1 + \delta$$

5. Все огибающие полученные итерационным процессом умножаются на расчетную функцию для получения огибающей сигнала (мгновенная амплитуда функции)

$$a_1(t) = \prod_{q=1}^n a_{1q}(t)$$

6. Огибающая сигнала  $a_1(t)$  умножается на частотную модуляцию сигнала  $s_{1n}(t)$  чтобы найти первую компоненту функции произведения оригинального сигнала

$$p_1(t) = a_1(t)s_{1n}(t)$$

где  $p_1(t)$  содержит самую высокочастотную составляющую сигнала.

7. Для получения нового сигнала  $u_1(t)$  отделяется первая компонента функции произведения  $p_1(t)$  от исходного сигнала  $x(t)$ . Используя  $u_1(t)$  в качестве исходного сигнала предыдущие шаги повторяются до тех пор пока  $u_k(t)$  не станет монотонной функцией.

$$\left. \begin{aligned} u_1(t) &= x(t) - p_1(t) \\ u_2(t) &= u_1(t) - p_2(t) \\ &\vdots \\ u_k(t) &= u_{k-1}(t) - p_k(t) \end{aligned} \right\}$$

Инва. № подл	Подп. и дата	Инва. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата

Оригинальный сигнал  $x(t)$  может быть представлен следующей формулой:

$$x(t) = \sum_{p=1}^k p_p(t) + u_k(t)$$

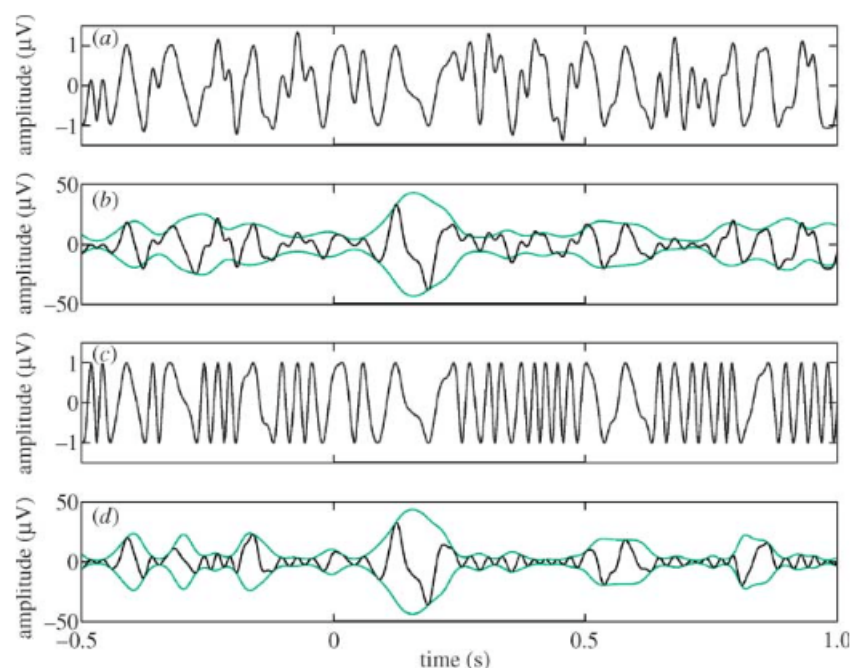


Рисунок 1.3 — Первоначальная частотная модуляция сигнала(*a*), первоначальная производящая функция и первоначальная расчетная функция огибающей(*b*), итоговая частотная модуляция сигнала(*c*), итоговая производящая функция и соответствующая огибающая(*d*)

### Оконное преобразование Фурье как частотно-временной анализ

Главной идеей данного подхода использовать оконную функцию для получения части сигнала. Предполагается, что сигнал в окне находится в неподвижном состоянии [17]. Полученный сигнал анализируется используя преобразование Фурье, чтобы определить частотные компоненты в окне. Затем оконная функция сдвигается вдоль временной оси сигнала, чтобы получить изменение частоты во времени. Это называется частотно-временным распределением. Оконное преобразование Фурье можно определить следующей формулой:

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t - \tau)e^{-j2\pi ft}dt \quad (1.5)$$

Инв. № подл	Подп. и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Лист		
Инв. № подл		Подп. и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)	17
Ли	Изм.	№ докум.		Подп.	Дат				

первоначальная производящая функция и первоначальная расчетная функция огибающей( $b$ ), итоговая частотная модуляция сигнала( $c$ ), итоговая производящая функция и соответствующая огибающая( $d$ )

### Оконное преобразование Фурье как частотно-временной анализ

Главной идеей данного подхода использовать оконную функцию для получения части сигнала. Предполагается, что сигнал в окне находится в неподвижном состоянии [17]. Полученный сигнал анализируется используя преобразование Фурье, чтобы определить частотные компоненты в окне. Затем оконная функция сдвигается вдоль временной оси сигнала, чтобы получить изменение частоты во времени. Это называется частотно-временным распределением. Оконное преобразование Фурье можно определить следующей формулой:

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t - \tau)e^{-j2\pi ft}dt \tag{1.5}$$



где  $x(t)$  – оригинальный сигнал,  $g(t)$  – оконная функция. Развернув формулу 1.5, можно получить описание исходного сигнала:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} STFT(\tau, f) g(t - \tau) e^{j2\pi f t} d\tau df \quad (1.6)$$

Из формул 1.5 и 1.6 видно, что данный метод рассчитывает частотный спектр путем сдвига окна. Таким образом временное и частотное разрешения ограничены принципом неопределенности Гейзенберга. Другими словами, используя более узкое окно может быть получено более высокое разрешение по времени, но разрешение по частоте будет хуже, соответственно используя более широкое окно можно получить более высокое разрешение по частоте, но более слабое разрешение по времени.

#### 1.2.4 Метод на основе Мел-частотных кепстральных коэффициентов

В методе, описанном в [10] для создания системы признаков с целью определения состояния подшипника используются мел-частотные кепстральные коэффициенты. В качестве классификаторов проверяются методы: метод опорных векторов (SVM), скрытая марковская модель, расширенные нейронные сети.

##### Мел-частотные кепстральные коэффициенты

МЧКК широко используются в области распознавания речи и способны представлять динамические характеристики сигнала, они способны извлекать как линейные, так и нелинейные свойства сигнала. МЧКК это тип вейвлета частотные шкалы которого расположена на линейной шкале для частот меньших 1 кГц и на логарифмической шкале для частот выше 1 кГц [18]. МЧКК содержат как частотные, так и временные характеристики сигнала, что делает их полезными для использования с целью выявления вектора признаков сигнала. Вычисления описываются следующими шагами:

1. Преобразование входного сигнала  $x(n)$  из временного представления в частотное, с помощью быстрого преобразования Фурье:

$$Y(m) = \frac{1}{F} \sum_{n=0}^{F-1} x(n) w(n) e^{-j \frac{2\pi}{F} nm}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Лист
	Подп. и дата		Взам. инв. №		
	Подп. и дата		Взам. инв. №		
	Подп. и дата		Взам. инв. №		
Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Лист
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	18

где  $F$  — число отсчетов,  $0 \leq m \leq F - 1$ , а  $w(n)$  - оконная функция Хэмминга определенная как:

$$w(n) = \beta(0.5 - 0.5 \cos \frac{2\pi n}{F-1})$$

где  $0 \leq n \leq F - 1$ , а  $\beta$  — коэффициент нормализации, который равен модулю среднего значения окна.

2. Мел-частотная деформация путем изменения частоты Мел используя следующее уравнение:

$$mel = 2595 \times \log_{10}(1 + \frac{f_{Hz}}{700})$$

Мел-частотная деформация использует группу фильтров, равномерно распределенных по шкале Мел. Группа фильтров имеет треугольную полосовую частотную характеристику, расстояние и величина которого определяется постоянным интервалом Мел-частот.

3. Данным шагом конвертирует логарифмический Мел спектр обратно в временное представление, что и является Мел-частотным кепстральным коэффициентом:

$$C_m^i = \sum_{n=0}^{F-1} \cos(m \frac{\pi}{F}(n + 0.5)) \log_{10}(H_n)$$

где  $0 \leq m \leq L-1$ , а  $L$  — число извлеченных коэффициентов из  $i$  –го окна сигнала.  $H_n$ — передаточная функция  $n$  –го фильтра в группе фильтров.

Данные мел-частотные кепстральные коэффициенты используются для представления характеристик сигнала.

Инв. № подл.	Подп. и дата						
	Взам. инв. №						
	Инв. № дубл.						
	Подп. и дата						
Инв. № подл.	Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)	Лист
							19

### 1.3 Выводы по главе 1

В данной главе произведён краткий обзор существующих методов диагностирования состояния подшипников качения. Проведенный обзор освещает основные аспекты и способы обработки вибросигналов и способы выявления характеристик сигнала применяемые при решении задачи. Большое количество работ по данной тематике подтверждает актуальность решаемой задачи и данного исследования в целом. Также, обзор выявляет схожесть базовых алгоритмов классификации повреждений подшипников качения применяемых как в рассмотренных методах, так и в предлагаемом в данной работе. Однако, более конкретные способы создания системы признаков отличаются, что подтверждает научную новизну данной работы.

Также на основе обзора существующих методов вибродиагностики рассмотренных в данной главе можно выявить проблемы решения задач вибродиагностики [19]:

- проблема формирования исходного описания: данная проблема связана с тем, что существующие модели и методы распознавания адаптированы к конкретному классу прикладных задач и требуют априорного знания свойств анализируемых сигналов;
- проблема формирования системы признаков, связанная с выбором конечного множества признаков, обеспечивающих однозначность решения задачи классификации на этапе распознавания и отвечающая требованиям необходимости и достаточности. Этап выбора системы признаков необходим для сокращения размерности входного описания. Учитывая, что задача сокращения размерности – оптимизационная задача, то для её решения необходимо использование критерия информативности. Отсутствие модели априорной неопределённости и модели её раскрытия породило большое количество методов в выборе критерия информативности, что, в свою очередь, порождает большое число возможных вариантов признаков;
- проблема принятия решений в условиях априорной неопределённости. Этап принятия решения заключается в сравнении с имеющимся эталоном признакового описания анализируемого вибросигнала. Предполагается, что эталону соответствует компактное множество точек в системе при-

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	Инв. № подл.	Лист	
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)		20

знаков. Однако помехи, структурные изменения одного и того же представителя класса приводят к перекрытию классов. Поэтому проблема принятия решения замыкается на проблемы формирования системы признаков, позволяющей сформировать эталон, имеющий компактное представление.

Использование методов теории активного восприятия (ТАВ) [19] позволяет решить описанные проблемы. Базовым в теории активного восприятия является  $U$ -преобразование, которое заключается в последовательном применении к анализируемому сигналу преобразований интегрирования и дифференцирования.

Теоретические аспекты предлагаемого метода диагностирования состояния подшипника качения на основе вибросигнала с использованием теории активного восприятия более подробно будут рассмотрены в главе 2.

Инв. № подл	Подп. и дата				Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)			Лист
								21

## Глава 2. Информационная модель классификации вибрационных сигналов

Предлагаемый метод вибродиагностики подшипников качения использует теорию активного восприятия (ТАВ) на этапе предварительной обработки сигнала и этапе формирования системы признаков. На этапе классификации, в целях получения более достоверных результатов используются несколько методов классификации: опорных векторов и  $k$  ближайших соседей.

### 2.1 Теория активного восприятия

ТАВ предложена профессором В. А. Утробиним [19]. Первоначально ТАВ использовалась для анализа изображений, но была адаптирована для применения к вибросигналу. Базовым преобразованием в теории активного восприятия является **U-преобразование**, которое заключается в последовательных операциях интегрирования и дифференцирования, применяемых к анализируемому сигналу. Также ТАВ включает раздел «Алгебра групп», которые посвящен анализу зависимостей между спектральными коэффициентами разложения. Обнаруженные зависимости допускают свое использование при формировании системы признаков анализируемого сигнала.

#### U-преобразование

Пусть  $f(t)$  — анализируемый вибросигнал, наблюдаемый на конечном участке времени. Результатом применения U-преобразования к сигналу  $f(t)$  — многоуровневое груботочное спектральное представление

$$D = \{d_{ij}\}, i = \overline{1, K}, j \in \overline{1, M_i},$$

где  $K$  — число уровней разложения,  $M_i$  — количество сегментов сигнала на  $i$ -ом уровне разложения,  $d_{ij}$  — спектр, включающий  $L$  спектральных коэффициентов (число используемых фильтров),  $d_{ij}\{k\}$  —  $k$ -ый спектральный коэффициент ( $k = \overline{1, L}$ ),  $f_{ij}$  — сегмент сигнала  $f$ , по которому вычислен спектр  $d_{ij}$ .

Пример вычисления двухуровневого U-представления сигнала из 16 отсчетов

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата						Лист
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)					22

**Уровень 1. Интегрирование** Сигнал разбивается на 4 части, амплитуды отсчетов, отнесенные к каждой части складываются (см. рис. 2.1, 4 части отделены пунктиром), в результате чего получается массив сумм  $S = \{12, 13, 8, 10\}$ .

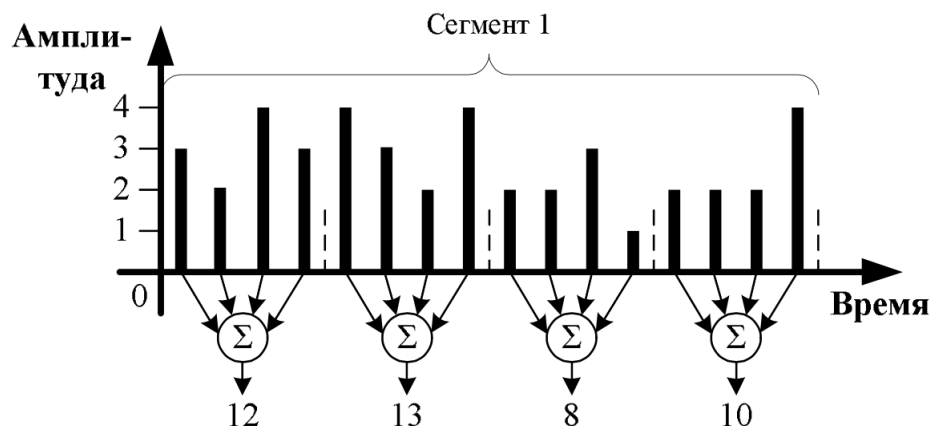
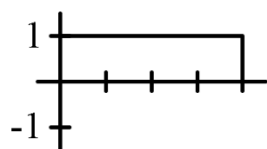
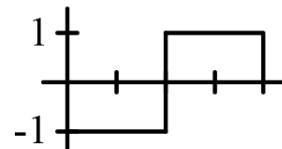


Рисунок 2.1 — Интегрирование сигнала на уровне 1.

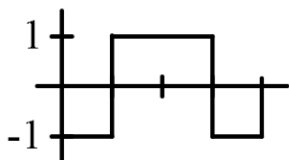
**Уровень 1. Дифференцирование** Применяя фильтры (показанные на рис. 2.2) к массиву сумм  $S$ , вычисляются значения спектральных коэффициентов. Для этого каждый фильтр поэлементно умножается на массив сумм  $S$ . Например, умножив массив  $S$  на фильтр №2, в результате получится массив  $S_2 = -12, -13, 8, 10$ , сумма которых представляет собой спектральный коэффициент  $(-12) + (-13) + 8 + 10 = -7$ . Результаты применения всех фильтров указаны в таблице 2.1.



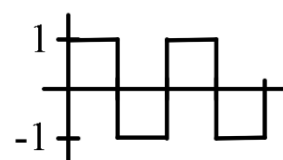
фильтр №1



фильтр №2



фильтр №3



фильтр №4

Рисунок 2.2 — Базисные функции

**Уровень 2. Интегрирование** Сигнал разбивается на 4 сегмента, каждый сегмент разбивается на 4 части, вычисляется сумма отсчетов, относящихся к каждой части (см. рис. 2.3).

Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат
----	------	----------	-------	-----

Таблица 2.1 — Вычисление мпектральных коэффициентов уровня 1

Результат умножения				Фильтр	Спектральные коэффициенты
12	13	8	10	№1	43
-12	-13	8	10	№2	-7
-12	13	8	-10	№3	-1
12	-13	8	-10	№4	-3

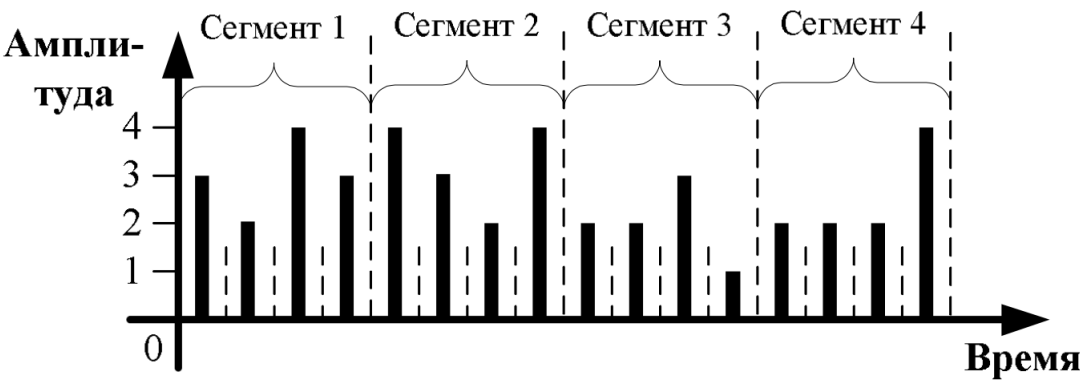


Рисунок 2.3 — Интегрирование сигнала на уровне 2.

**Уровень 2. Дифференцирование** С помощью фильтров изображенных на рисунке 2.2 и результатов интегрирования, вычисляются значения спектральных коэффициентов (см. таблицу 2.2).

Таблица 2.2 — Вычисление мпектральных коэффициентов уровня 1

Результат умножения								Фильтр	Спектральные коэффициенты	
сегмент 1				сегмент 2					сегмент 1	сегмент 2
3	2	4	3	4	3	2	4	№1	12	13
-3	-2	4	3	-4	-3	2	4	№2	2	-1
-3	2	4	-3	-4	3	2	-4	№3	0	-3
3	-2	4	-3	4	-3	2	-4	№4	2	-1
сегмент 3				сегмент 4					сегмент 3	сегмент 4
2	2	3	1	2	2	2	4	№1	8	10
-2	-2	3	1	-2	-2	2	4	№2	0	2
-2	2	3	-1	-2	2	2	-4	№3	2	-2
2	-2	3	-1	2	-2	2	-4	№4	2	-2

В приведенном примере для вычисления спектрального представления сигнала используются 4 фильтра изображенных на рисунке 2.2, однако для решения задачи вибродиагностирования подшипника качения используются 16 фильтров для более точного анализа сигнала. Используемые фильтры изображены на рисунке 2.4.

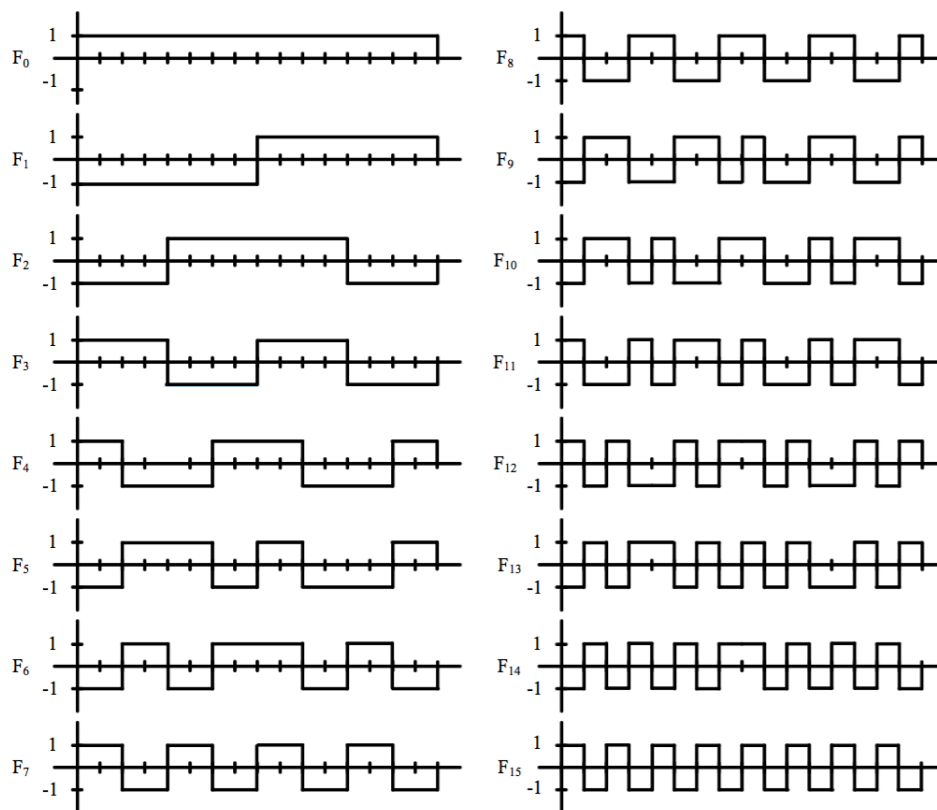


Рисунок 2.4 — Используемые фильтры при вычислении спектрального представления вибросигнала.

## Алгебра групп

Алгебра групп используется для формирования системы признаков вибросигнала. С помощью замкнутых и полных групп выполняется спектрально-корреляционный анализ. Полные группы позволяют выявить корреляционные связи между операторами. Замкнутые группы позволяют выявить корреляционные связи между полными группами. Проводя аналогию между алгеброй групп и языком, можно ввести следующие соответствия: оператор — алфавит языка, полная группа — слово, замкнутая группа — словосочетание [20] см. рис. 2.5.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата															
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <table border="1"> <tr> <td>Ли</td> <td>Изм.</td> <td>№ докум.</td> <td>Подп.</td> <td>Дат</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table> </div> <div> <p><b>ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)</b></p> </div> <div> <p>Лист</p> <p>25</p> </div> </div>										Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат					
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат															



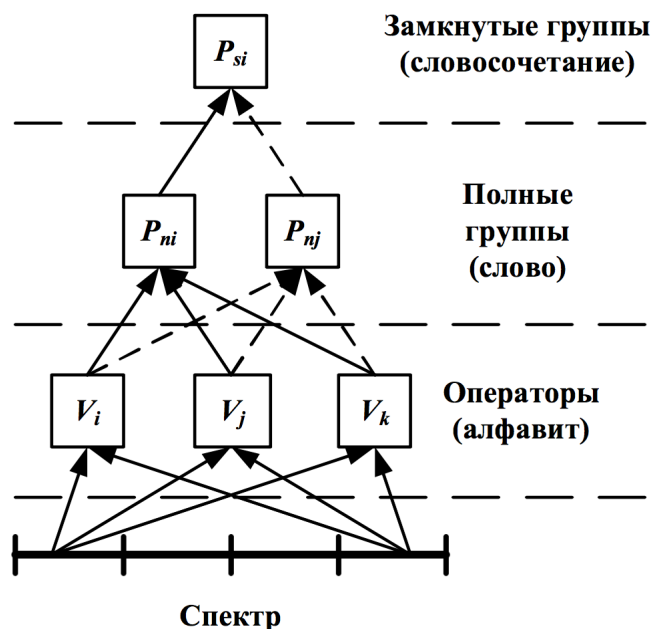


Рисунок 2.5 — Иерархия операторов и групп.

Имея множество фильтров  $\{F_i\}$  изображенных на рис. 2.4, примем, что  $(+1 \rightarrow 1)$ ,  $(-1 \rightarrow 0)$ , таким образом получим множество бинарных операторов  $\{V_i\}$  см. рис. 2.6. Для этих операторов допустимы теоретико-множественные операции объединения (сложения) и пересечения (умножения) [19].

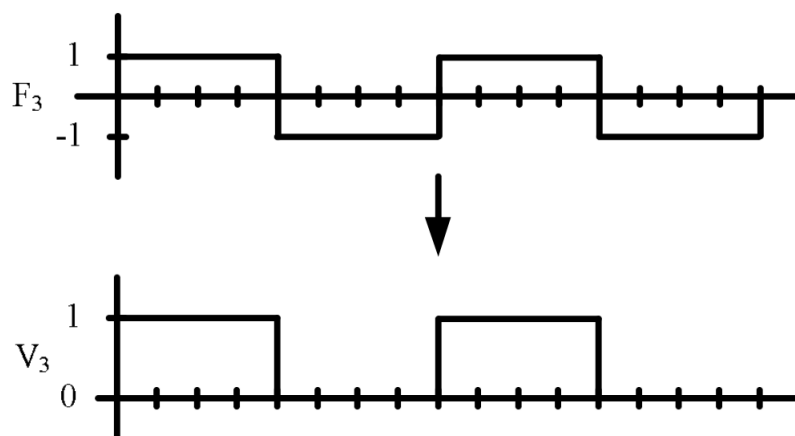


Рисунок 2.6 — Вычисление оператора по фильтру.

### Полные группы

Полная группа формируется из трёх операторов  $V_i, V_j, V_k$  в том случае, если выполняется следующее условие:

$$V_i + V_j + V_k = e_1 (e_1 = V_0, i \neq j \neq k \neq 0).$$

Перечислив все возможные сочетания операторов можно получить множество полных групп  $\{P_{ni}\}$ . В качестве примера рассмотрим операторы  $V_1, V_8, V_9$ , ре-

Инв. № подл.					Подп. и дата
					Взам. инв. №
					Инв. № дубл.
					Подп. и дата
<p>Рисунок 2.6 — Вычисление оператора по фильтру.</p>					
<p><b>Полные группы</b></p> <p>Полная группа формируется из трёх операторов <math>V_i, V_j, V_k</math> в том случае, если выполняется следующее условие:</p> $V_i + V_j + V_k = e_1 (e_1 = V_0, i \neq j \neq k \neq 0).$ <p>Перечислив все возможные сочетания операторов можно получить множество полных групп <math>\{P_{ni}\}</math>. В качестве примера рассмотрим операторы <math>V_1, V_8, V_9</math>, ре-</p>					
					Лист
					26
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	

зультата сложения представлены в таблице 2.3, которая доказывает, что эти операторы образуют полную группу.

Таблица 2.3 — Проверка операторов  $V_1, V_8, V_9$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$V_1$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$V_8$	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
$V_9$	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
$V_1 + V_8 + V_9$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Допустим, что спектр сигнала имеет отклики представленные в таблице 2.4, тогда проверив наличие группы  $V_1 V_8 V_9$  можно увидеть наличие данной группы в спектре сигнала, т.к. отклики операторов, составляющих группу отличны от нуля.

Таблица 2.4 — Спектр сигнала

$F_0$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	$F_8$	$F_9$	$F_{10}$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{14}$	$F_{15}$
100	-12	-6	4	3	9	11	23	-2	5	21	11	3	0	7	8

Значения операторов  $V_1$  и  $V_8$  отрицательны, значит данные операторы являются инверсными. Если число инверсных операторов:

- чётно — образ полной группы вычисляется на операции умножения;
- нечётно — образ полной группы вычисляется на операции сложения;

Вычисление образа группы  $V_1 \bar{V}_8 \bar{V}_9$  представлено в таблице 2.5

Таблица 2.5 — Вычисление образа группы  $V_1 \bar{V}_8 \bar{V}_9$

	$V_0$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$	$V_{11}$	$V_{12}$	$V_{13}$	$V_{14}$	$V_{15}$
$\bar{V}_1$	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	×															
$\bar{V}_8$	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
	×															
$V_9$	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
	=															
$\bar{V}_1 \bar{V}_8 V_9$	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Аналогичным образом проверяется наличие любой полной группы в спектре.

### Замкнутые группы

Замкнутую группу  $V_i V_j V_k \bar{V}_l$  можно описать восемью эквивалентными способами:

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)													Лист
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат														27

Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Инв. № дубл.	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

1.  $\bar{V}_i V_j + V_k V_l$ ;
2.  $V_i \bar{V}_j + V_k V_l$ ;
3.  $V_i V_j + \bar{V}_k V_l$ ;
4.  $V_i V_j + V_k \bar{V}_l$ ;
5.  $\bar{V}_i \bar{V}_j + \bar{V}_k V_l$ ;
6.  $\bar{V}_i \bar{V}_j + V_k \bar{V}_l$ ;
7.  $\bar{V}_i V_j + \bar{V}_k \bar{V}_l$ ;
8.  $V_i \bar{V}_j + \bar{V}_k \bar{V}_l$ .

Алгоритм построения замкнутой группы:

1. выбирается полная группа и формируются её образы на операции умножения:

- (a)  $V_i V_j V_k$ ;
- (b)  $\bar{V}_i \bar{V}_j V_k$ ;
- (c)  $\bar{V}_i V_j \bar{V}_k$ ;
- (d)  $V_i \bar{V}_j \bar{V}_k$

2. анализируются полученные образы, путем проверки условия: если в состав образа не входит оператор  $V_0$ , то операторы, входящие в него, образуют замкнутую группу.

Рассмотрим группу операторов  $V_1 V_8 V_9$ , варианты записи образов которой представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 — Образы группы  $V_1, V_8, V_9$

	$V_0$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$	$V_{11}$	$V_{12}$	$V_{13}$	$V_{14}$	$V_{15}$
$V_1 V_8 V_9$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
$\bar{V}_1 \bar{V}_8 V_9$	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\bar{V}_1 V_8 \bar{V}_9$	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1 \bar{V}_8 \bar{V}_9$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0

Определим операторы, входящие в каждый образ:

1.  $V_1 V_8 V_9 — V_8, V_{11}, V_{12}, V_{15}$ ;
2.  $\bar{V}_1 \bar{V}_8 V_9 — V_1, V_2, V_5, V_6$ ;
3.  $\bar{V}_1 V_8 \bar{V}_9 — V_0, V_3, V_4, V_7$ ;
4.  $V_1 \bar{V}_8 \bar{V}_9 — V_9, V_{10}, V_{13}, V_{14}$ .

Отсюда видно, что для образа полной группы  $\bar{V}_1 V_8 \bar{V}_9$  нельзя вычислить замкнутую группу, т.к. он включает оператор  $V_0$ .

После обработки всех полных групп по вышеописанному алгоритму, получается множество замкнутых групп  $\{P_{si}\}$ .

Имея спектр сигнала представленный в таблице 2.4, можно проверить наличие группы  $V_8V_9V_{10}V_{11}$ . Значения операторов, составляющих группу, отличны от нуля, число инверсных операторов группы нечётно, следовательно, операторы  $V_8, V_9, V_{10}, V_{11}$  образуют замкнутую группу (если число инверсных операторов группы чётно, тогда они образуют замкнутое множество). Образ группы приведен в таблице 2.7.

Таблица 2.7 — Образы группы  $V_8V_9V_{10}V_{11}$

	$V_0$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$	$V_{11}$	$V_{12}$	$V_{13}$	$V_{14}$	$V_{15}$
$\bar{V}_8$	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
$V_9$	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1
$V_{10}$	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0
$V_{11}$	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0
$\bar{V}_8V_9 + V_{10}V_{11}$	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1

Аналогичным образом можно проверить наличие в спектре любой другой замкнутой группы.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата						Лист
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)					29

## 2.2 Реализация системы вибродиагностики с использованием теории активного восприятия

Описание вибросигнала, представленное в виде вектора состояний операторов теории активного восприятия, рассматривает соседние сегменты  $\varphi$  и  $\varphi + 1$  как не связанные друг с другом. В связи с этим предлагается модель признакового описания, в которой учитываются связи между соседними сегментами вибросигнала. Метод вычисления признакового описания в таком случае состоит в формировании матрицы вероятностей переходов между описаниями соседних сегментов.

### 2.2.1 Предварительная обработка

Для увеличения числа сигналов в базе сигналов, на основе которых будет производиться классификация сигналов, каждый сигнал делится на несколько частей, амплитуды отсчетов, отнесенные к каждой части складываются, в результате чего получается массив сумм (см. рис. 2.1), который в дальнейшем используется для формирования системы признаков.

$$S = \left\{ \sum_{i=1}^N A_i \right\},$$

где  $A$  — амплитуда отсчета,  $N$  — количество отсчетов.

### 2.2.2 Формирование системы признаков

После проведения предварительной обработки сигнала **Sig** и деления его на части

$$\mathbf{Sig} = \{\varphi_i\}, i \in \overline{1, m}$$

для каждого  $S = \varphi_i$  формируется система признаков.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата					
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>Ли</p> <p>Изм.</p> <p>№ докум.</p> <p>Подп.</p> <p>Дат</p> </div> <div> <p>ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)</p> </div> <div> <p>Лист</p> <p>30</p> </div> </div>									

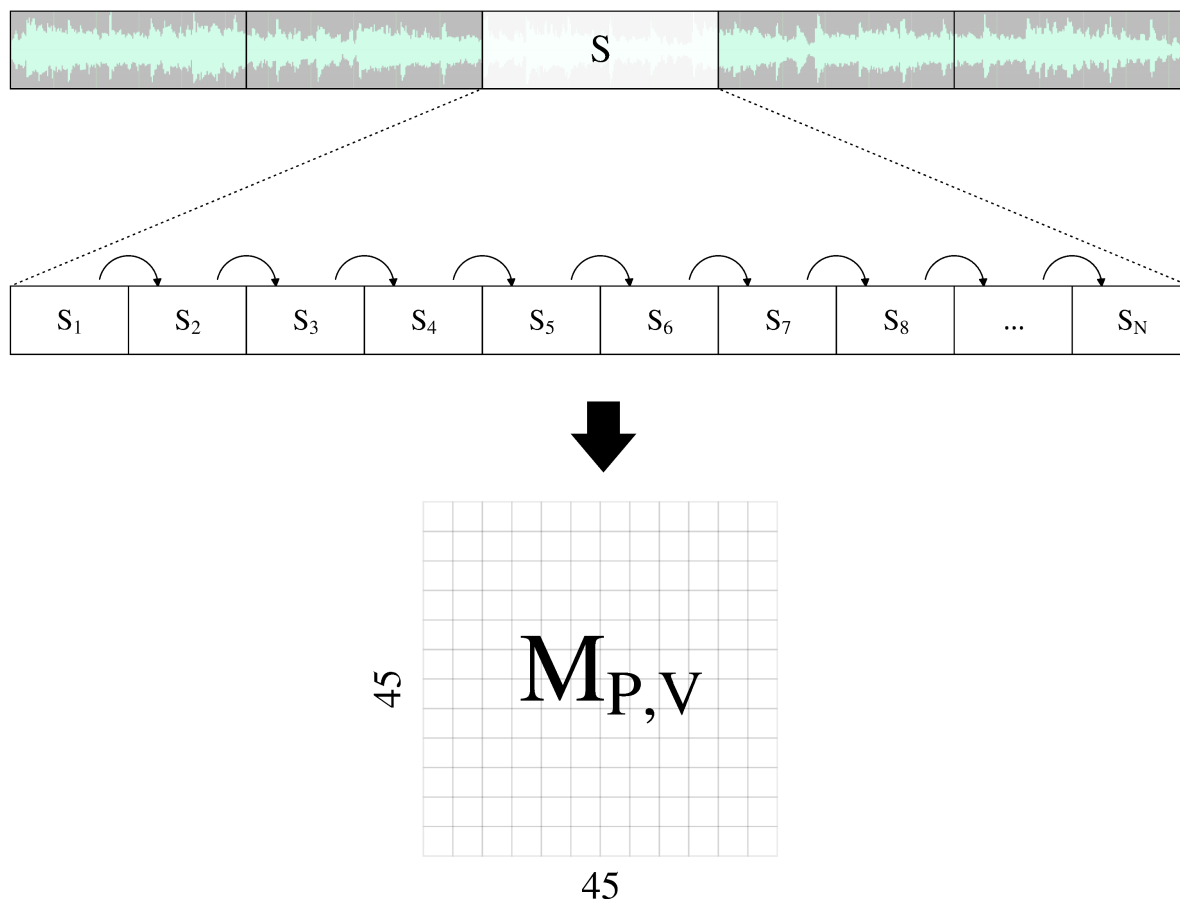


Рисунок 2.7 — Схема обработки сигнала.

Используя инструментарий в виде теории активного восприятия и алгебры групп можно сформировать алгоритм формирования системы признаков вибро-сигнала в целях диагностики состояния подшипника качения:

$$S = \{S_i\}, i \in \{1, \overline{N}\}$$

$$\forall i \in \overline{1, (N-1)}$$

$$M_{P,V} = PROB[M_{P,V}, D_v[S_i], D_v[S_{i+1}]]$$

Инв. № подл	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата					
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)				
					Лист				
					31				

*PROB* :

$$A = D_v[S_i]$$

$$B = D_v[S_{i+1}]$$

$$M = M_{P,V}$$

$$\forall k \in \overline{1,15}$$

$$v_1 = \begin{cases} 1, \text{ если } A_k < 0 \\ 2, \text{ если } A_k = 0 \\ 3, \text{ если } A_k > 0 \end{cases}$$

$$v_1 = v_1 + (k - 1) * 3$$

$$\forall l \in \overline{1,15}$$

$$v_2 = \begin{cases} 1, \text{ если } B_l < 0 \\ 2, \text{ если } B_l = 0 \\ 3, \text{ если } B_l > 0 \end{cases}$$

$$v_2 = v_2 + (l - 1) * 3$$

$$M_{v_1, v_2} = M_{v_1, v_2} + 1$$

где:

- $S$  — сигнал, для которого необходимо сформировать систему признаков;
- $D_v[S_i]$  — массив состояний операторов описывающий  $i$ -й участок сигнала, значения которого несут смысл:
  - $< 0$  — сигнал описывается соответствующим инверсным оператором;
  - $= 0$  — сигнал не содержит оператора в своем описании;
  - $> 0$  — сигнал описывается соответствующим оператором;
- $M_{P,V}$  — матрица переходов операторов, характеризующая сигнал.

Таким образом, после выполнения описанных шагов формируется матрица  $M_{P,V}$ , из которой, путем построчной развертки получается вектор  $H$ , размерность которого равна  $1 \times 2025 (45 \times 45)$ . Пример матрицы  $M_{P,V}$  представлен в таблице 2.8. Получение вектора  $H$  является конечным шагом для формирования системы признаков вибросигнала, с целью диагностирования состояния подшипника качения.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <span><b>ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)</b></span> <span>Лист</span> </div> <div style="text-align: right; font-size: 1.2em;">32</div>
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	

Таблица 2.8 — Матрица переходов  $M_{P,V}$

		$V_1^2$			$V_2^2$			...	$V_{14}^2$			$V_{15}^2$		
		-1	0	1	-1	0	1		-1	0	1	-1	0	1
$V_1^1$	-1	154	0	257	170	0	241		209	0	202	200	0	211
	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
	1	257	0	80	209	0	128		161	0	176	158	0	179
$V_2^1$	-1	247	0	132	171	0	208		211	0	168	163	0	216
	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
	1	164	0	205	208	0	161		159	0	210	195	0	174
$\vdots$														
$V_{14}^1$	-1	236	0	135	210	0	161		115	0	256	241	0	130
	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
	1	175	0	202	169	0	208		255	0	122	117	0	260
$V_{15}^1$	-1	180	0	179	188	0	171		119	0	240	219	0	140
	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
	1	231	0	158	191	0	198		251	0	138	139	0	250

Инва. № подл.	Подп. и дата	Инва. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата



## 2.2.3 Классификация

### Метод опорных векторов

Метод опорных векторов является мощным и широко используемым методом решения задач классификации благодаря его способности обобщения данных. Метод опорных векторов способен максимизировать разницу между данными, с помощью которых проводится обучение, и границами решения, которые могут быть представлены в виде квадратичной задачи оптимизации в пространстве признаков [10]. Подмножества признаков, которые являются самыми близкими к границе решения называются опорными векторами (см. рис. 2.8).

Для линейно разделимой задачи бинарной классификации строится гиперплоскость

$$w^T x + b = 0$$

так, что расстояние между гиперплоскостью и ближайшей точкой максимально, что можно представить в виде задачи оптимизации:

$$\begin{cases} \min_w \frac{1}{2}(w^T w) \\ d^i((w^T x^j) + b) \geq 1 \end{cases}$$

где  $d^i \in \{-1, 1\}$  —  $i$ -й желаемый результат,  $x^i \in R^P$  —  $i$ -й входной сигнал из обучающего набора данных  $\{x^i, d^i\}_{i=1}^N$ .

Таким образом ближайшая точка к гиперплоскости находится на расстоянии  $\frac{1}{\|w\|}$ . Увеличение расстояния соответствует уменьшению евклидовой нормы опорного вектора.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата						
					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)					Лист
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат						34

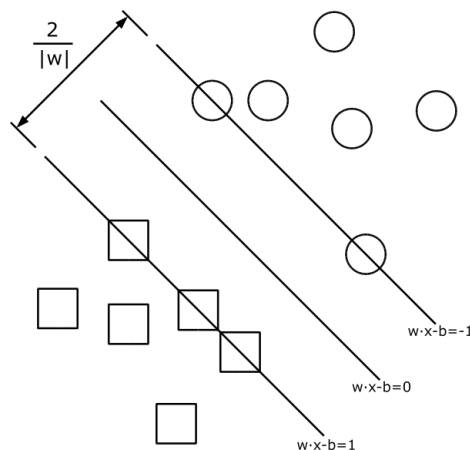


Рисунок 2.8 — Оптимальная разделяющая гиперплоскость для метода опорных векторов, построенная на точках из двух классов. Ближайшие к параллельным гиперплоскостям точки называются опорными векторами

На практике, часто встречается случай, что разделяющая гиперплоскость не существует, следовательно ограничение ослабляется путем введения дополнительных переменных  $\xi_i, i = 1, \dots, N$ , характеризующих величину ошибки на объектах  $x_i$ , таким образом задача оптимизации приводится к виду:

$$\begin{cases} \min_{w, \xi} \frac{1}{2}(w^T w) + C \sum_{i=1}^N \xi_i \\ d^i((w^T x^j) + b) \geq 1 - \xi_i \\ \xi_i \geq 0, i = 1, \dots, N \end{cases}$$

Коэффициент  $C$  — параметр настройки метода, который позволяет регулировать отношение между максимизацией ширины разделяющей полосы и минимизацией суммарной ошибки.

Путем введения множителя Лагранжа  $\alpha_i$  и использования теоремы Куна-Таккера [21] функция принятия решения для вектора  $x$  принимает вид:

$$f(x) = \text{sign} \left( \sum_{i=1}^N d^i \alpha_i \langle x, x^i \rangle + b \right)$$

Также существует другой способ создания нелинейного классификатора, который крайне похож на алгоритм линейной классификации, однако каждое скалярное произведение  $\langle x, x^i \rangle = (x^T)(x^i)$  заменяется нелинейной функцией ядра (скалярным произведением в пространстве с большей размерностью) входные данные отображаются в более высокой размерности пространства. В этом пространстве уже может существовать оптимальная разделяющая гиперплоскость.

Подп. и дата					
Взам. инв. №					
Инв. № дубл.					
Подп. и дата					
Инв. № подл.					
ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)					Лист
					35
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	

- полиномиальное ядро  $k(x, x^i) = (x \times x^i + 1)^d$
- ядро Гаусса  $k(x, x^i) = \exp(\frac{-(x-x^i)^2}{\delta^2})$ , где числитель — степень полиномиального ядра,  $\delta^2$  — пропускная способность ядра Гаусса.

Данный классификатор обычно основан на евклидовом расстоянии между испытуемым образцом и указанным образцом из тестового набора. Пусть  $x_i$  будет входной образец с  $p$  признаками  $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})$ , где  $n$  — общее количество входных образцов. Евклидово расстояние между  $x_i$  и  $x_l$  определяется:

- если  $k = 3$ , то она классифицируется как 2-й класс, потому что внутри меньшего круга 2 треугольника и только 1 квадрат;

- если  $k = 5$ , то он будет классифицирован как 1-й класс (3 квадрата против 2-х треугольников внутри большего круга).

Использование евклидова расстояния в качестве характеризующей функции накладывает свои ограничения: разные атрибуты могут иметь разный диапазон представленных значений в выборке (например атрибут А представлен в диапазоне от 0.1 до 0.5, а атрибут Б представлен в диапазоне от 1000 до 5000), то значения дистанции могут сильно зависеть от атрибутов с большими диапазонами. Поэтому данные обычно подлежат нормализации.

## 2.3 Выводы по главе 2

В данной главе приведены теоретические аспекты разработанного метода вибродиагностики подшипников качения, а также рассмотрена реализация системы распознавания. В данной главе также представлены варианты реализации каждого из этапов анализа вибросигнала. Также 2-я глава посвящена описанию формирования системы признаков, которое освещает научную новизну данной работы.

Инв. № подл.	Подп. и дата				Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата													
<table border="1"> <tr> <td>Ли</td> <td>Изм.</td> <td>№ докум.</td> <td>Подп.</td> <td>Дат</td> <td rowspan="2">ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)</td> <td>Лист</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>37</td> </tr> </table>								Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)	Лист						37
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)	Лист														
						37														

### Глава 3. Вычислительный эксперимент

Вычислительный эксперимент проводился с использованием данных опубликованных в [23]. В представленной базе данных записан сигнал полученный с акселерометров установленных:

- DE — на корпусе двигателя в месте подключения нагрузки;
- FE — на вентиляторе;
- BA — на поддерживающей установке.

Фотография и схема экспериментального стенда изображены на рис. 3.1 и на рис. 3.2 соответственно. Также в представленном наборе сигналов содержатся вибросигналы с искусственными повреждениями подшипников качения:

- на внешней дорожке;
- на внутренней дорожке;
- на теле качения.

Размеры повреждений составляют 0.18, 0.36, 0.53, 0.71 мм в диаметре. Дефекты внешней дорожки являются стационарными, поэтому положение дефекта относительно зоны нагрузки подшипника оказывает влияние на вибросигнал. Для исследования влияния этого эффекта дефекты нанесены в трёх позициях (если наложить подшипник на циферблат часов, то дефекты нанесены в районе 3, 6 и 12 часов). Таким образом, будет производится классификация шести состояний подшипника:

1. отсутствие повреждений;
2. повреждение на внутренней дорожке;
3. повреждение на теле качения;
- 4–6. повреждение на внешней дорожке.

Инв. № подл	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата						
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)					Лист
										38

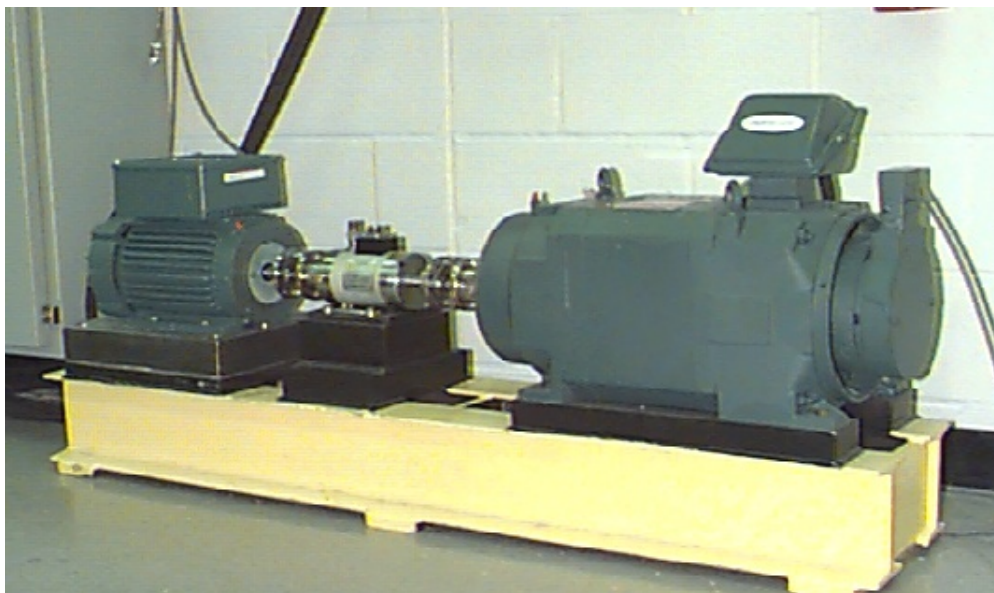


Рисунок 3.1 — Тестовый стенд для записи вибросигнала

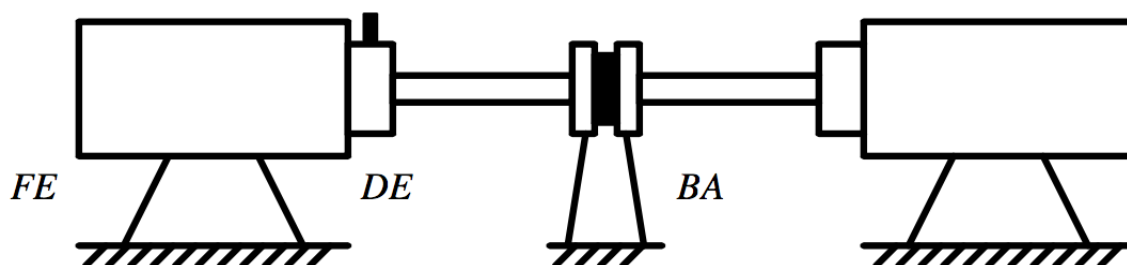


Рисунок 3.2 — Схематичное изображение тестового стенда представленного на рис. 3.1.

Перед проведением экспериментальных замеров были собраны результаты полученные с помощью других методов, данные результаты представлены в таблице 3.1.

В рамках данной работы, для проверки практической работоспособности предлагаемого метода вибродиагностики была произведена серия экспериментов. В данной главе представлены несколько результатов тестирования, которое проводилось на ноутбуке со следующими характеристиками:

- процессор: Intel Core i5 2,4 ГГц;
- оперативная память: 6 ГБ.

Метод вибродиагностики реализован в программной среде Matlab R2014b. Произведенные эксперименты использовали сигнал записанный акселерометром установленном на DE (см. рис. 3.2) с частотой дискретизации 12 кГц.

Для проведения экспериментов было разработано приложение, скриншот которого предсоставлен на рисунке 3.3.

Подп. и дата		Взам. инв. №		Инв. № дубл.		Подп. и дата		Инв. № подл.	
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)				
					Лист 39				

Таблица 3.1 — Результаты работы методов вибродиагностики рассмотренных в [24]

Признаки	Количество признаков	Метод классификации	Количество классифицируемых состояний	Точность распознавания ( $R$ , в %)
Мел-частотные кепстральные коэффициенты	16	Скрытая марковская модель	4	99
Мел-частотные кепстральные коэффициенты	16	Модель гауссовой смеси	4	94
Коэффициенты пакетного вейвлет разложения	32	Метод опорных векторов	21	99,3
Статистические признаки	26	Метод опорных векторов	21	92,88
Спектр комплексной огибающей	72	Метод опорных векторов	21	85,47
Коэффициенты пакетного вейвлет разложения	32	$K$ ближайших соседей	21	97,76—97,35
Статистические признаки	26	$K$ ближайших соседей	21	96,64—95,69
Спектр комплексной огибающей	72	$K$ ближайших соседей	21	98,83—99,92
Свойства коэффициентов вейвлет разложения	5	Сеть радикально-базисных функций	4	72,1
Свойства коэффициентов вейвлет разложения	5	Многослойный персептрон	4	100
Свойства коэффициентов вейвлет разложения	5	Вероятностная нейронная сеть	4	97,5
Гистограммы замкнутых групп	840	Расстояние относительно эталона	21	95—100

Инв. № подл.	Подп. и дата
Инв. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Инв. № инв.





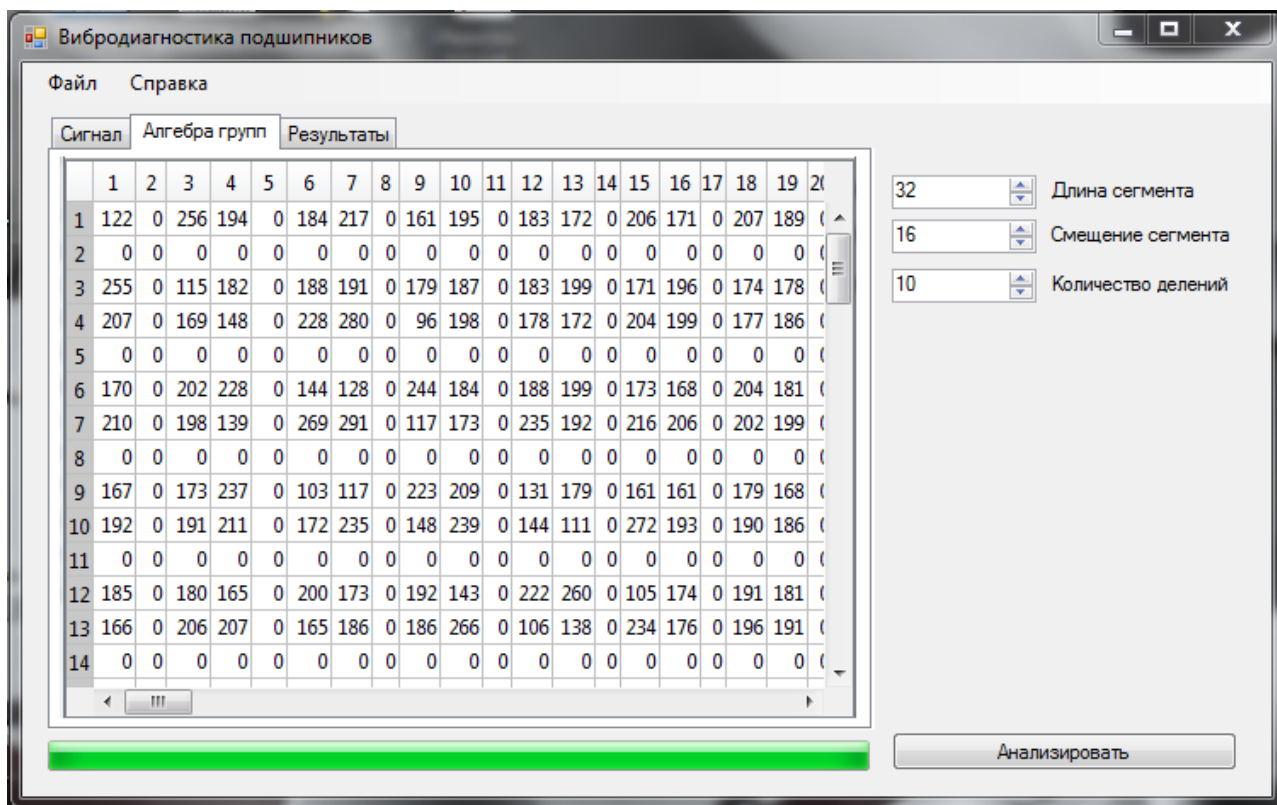


Рисунок 3.4 — Скриншот приложения для вибродиагностики подшипников качения.

Рисунок 3.5 показывает способ отображения результата работы программы, который отражает характер повреждения, а также процент точности классификации повреждения.

Инва. № подл	Подп. и дата	Инва. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-start;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <div style="width: 20%;">Ли</div> <div style="width: 20%;">Изм.</div> <div style="width: 20%;">№ докум.</div> <div style="width: 20%;">Подп.</div> <div style="width: 20%;">Дат</div> </div> <div style="width: 100%; height: 20px;"></div> </div> <div style="width: 80%; text-align: center;"> <p><b>ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)</b></p> </div> <div style="width: 10%; text-align: center;"> <p>Лист</p> <p>42</p> </div> </div>				



Таблица 3.2 — Результаты вычислительного эксперимента для сигнала полученного с DE

Длина сегмента, $L$ , в отсчетах	Смещение сегмента	Кол-во частей сигнала, $P$	Точность распознавания, $R$ в %	
			KNN	SVM
32	16	40	99,86	96,22
	32	40	96,08	95,27
	16	20	99,73	94,05
	32	20	97,29	92,70
	16	10	94,84	91,61
	32	10	89,67	82,58
64	32	40	90,14	90,68
	64	40	84,87	87,84
	32	20	92,97	88,11
	64	20	88,11	82,97
	32	10	81,94	81,29
	64	10	76,13	76,77
128	32	40	86,08	89,87
	64	40	79,19	87,43
	128	40	72,16	81,62
	32	20	91,08	89,19
	64	20	82,16	83,24
	128	20	78,38	82,16
	32	10	83,87	80,65
	64	10	83,22	82,58
	128	10	68,39	76,13

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата

## Результаты эксперимента при добавлении шума

Для проведения эксперимента в условиях зашумленного сигнала применялось искусственное добавление гауссовского шума при отношении сигнал/шум равным: 20 дБ, 10 дБ, 0.1 дБ. Обычно отношение сигнал/шум выражается в децибелах (дБ). Чем больше это отношение, тем меньше шум влияет на характеристики системы.

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{sig}}{P_{noise}} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{A_{sig}}{A_{noise}} \right),$$

где  $SNR$  — отношение сигнал/шум,  $P$  — средняя мощность, а  $A$  — среднеквадратичное значение амплитуды [25].

Таблица 3.3 — Результаты вычислительного эксперимента для сигнала полученного с DE при ОСШ 20 дБ

Длина сегмента, $L$ , в отсчетах	Смещение сегмента	Кол-во частей сигнала, $P$	Точность распознавания, $R$ в %	
			KNN	SVM
32	16	40	99,05	98,78
	32	40	93,92	97,97
	16	20	99,73	98,11
	32	20	97,03	97,03
	16	10	98,07	94,84
	32	10	91,61	94,84
64	32	40	87,43	92,97
	64	40	79,87	89,73
	32	20	90,81	92,16
	64	20	85,14	87,30
	32	10	85,16	89,03
	64	10	78,07	84,52
128	32	40	84,05	92,97
	64	40	76,22	86,76
	128	40	71,62	82,03
	32	20	86,76	93,24
	64	20	79,73	90,00
	128	20	76,22	80,00
	32	10	86,45	91,61
	64	10	80,00	83,23
	128	10	72,90	78,71

Инв. № подл.	Подп. и дата
Инв. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат

Таблица 3.4 — Результаты вычислительного эксперимента для сигнала полученного с DE при ОСШ 10 дБ

Длина сегмента, $L$ , в отсчетах	Смещение сегмента	Кол-во частей сигнала, $P$	Точность распознавания, $R$ в %	
			KNN	SVM
32	16	40	96,49	96,22
	32	40	84,32	93,92
	16	20	98,92	97,30
	32	20	90,27	97,30
	16	10	98,71	92,26
	32	10	90,32	90,97
64	32	40	77,57	83,92
	64	40	68,11	78,11
	32	20	78,92	87,03
	64	20	75,95	84,32
	32	10	74,19	80,65
	64	10	72,90	73,55
128	32	40	76,62	85,81
	64	40	67,97	78,92
	128	40	56,22	71,08
	32	20	77,84	87,03
	64	20	70,81	84,05
	128	20	62,97	70,54
	32	10	76,13	85,16
	64	10	70,32	77,42
	128	10	63,87	72,90

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата

Таблица 3.5 — Результаты вычислительного эксперимента для сигнала полученного с DE при ОСШ 0.1 дБ

Длина сегмента, $L$ , в отсчетах	Смещение сегмента	Кол-во частей сигнала, $P$	Точность распознавания, $R$ в %	
			KNN	SVM
32	16	40	64,60	81,89
	32	40	48,92	73,11
	16	20	77,84	83,78
	32	20	59,19	75,95
	16	10	74,84	77,42
	32	10	67,10	70,32
64	32	40	38,11	61,35
	64	40	29,87	55,68
	32	20	45,68	64,05
	64	20	41,08	57,03
	32	10	57,42	60,65
	64	10	43,23	54,84
128	32	40	45,68	61,49
	64	40	34,46	56,35
	128	40	27,97	47,70
	32	20	45,68	65,14
	64	20	38,92	60,00
	128	20	29,73	53,51
	32	10	50,32	61,29
	64	10	44,52	56,77
	128	10	34,84	50,97

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата

Полученные результаты показывают, что для достижения наилучшего результата целесообразнее использовать следующие параметры:

- длина сегмента — 32;
- смещение сегмента — 16;
- кол-во частей на которое разбивается сигнал — 40;
- классификатор — KNN;

Однако, при появлении в сигнале шума (при ОСШ = 0,1 дБ), следует увеличить длину анализируемых отрезков сигнала поэтому параметры будут следующими:

- длина сегмента — 32;
- смещение сегмента — 16;
- кол-во частей на которое разбивается сигнал — 20;
- классификатор — SVM;

### 3.2 Выводы по главе 3

В данной главе представлен краткий обзор разработанного программного комплекса, а также приведены результаты проведенных экспериментов, которые показывают работоспособность предлагаемого метода вибродиагностики подшипников качения. Полученные результаты демонстрируют, что разработанный метод устойчив к появлению шумов в исследуемом сигнале, таким образом конечная точность классификации повреждений составляет:

- 99,86% при анализе незашумленного сигнала;
- 99,73% при анализе сигнала с ОСШ = 20 дБ;
- 98,92% при анализе сигнала с ОСШ = 10 дБ;
- 83,78% при анализе сигнала с ОСШ = 0,1 дБ.

Данные результаты показывают, что разработанный метод обладает большим процентом точности в сравнении с большинством существующих методов вибродиагностики приведенных в таблице 3.1. Однако, методы показывающие больший процент точности распознавания обладают меньшим числом распознаваемых состояний исходя из чего можно сделать вывод, что предлагаемый метод способен успешно конкурировать с существующими методами вибродиагностики.

Инв. № подл.	Подп. и дата					
	Взам. инв. №					
	Инв. № дубл.					
	Подп. и дата					
	Инв. № подл.					
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)	Лист
						48

## Заключение

В данной работе проведено исследование существующих методов вибродиагностики подшипников качения.

В рамках выполнения диссертации разработан новый метод вибродиагностики подшипников качения на основе теории активного восприятия, с использованием матрицы переходов.

На основе разработанного метода сформирован алгоритм вибродиагностики подшипников качения, реализованный в программном обеспечении. С помощью реализованного ПО было проведено экспериментальное исследование, в рамках которого были получены результаты, подтверждающие корректную работу разработанного метода.

Показатели работы разработанного метода оказались лучше конкурентов, данный факт делает целесообразным дальнейшую работу над данным исследованием.

Инв. № подл	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата						
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат	ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)					Лист
										49



## Список сокращений и условных обозначений

**АМ (AR)** - авторегрессионная модель

**МЭМ (EMD)** - метод эмпирических мод

**ММЭМ (EEMD)** - модифицированный метод эмпирических мод

**МОВ (SVM)** - метод опорных векторов

**МБС (KNN)** - метод  $k$  ближайших соседей

**ТАВ** - теория активного восприятия

**ОСШ (SNR)** - отношение сигнал/шум

Инв. № подл	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата						
					Лист					
					50					

Инв. № подл	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата					
					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)				
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дат					

## Список литературы

1. Повреждения подшипников / Подшипник.ру УФА. — URL: <http://www.pkufa.ru/support/defects/> (дата обр. 2016).
2. Гончаров А., Гай В. Метод вибро-диагностики подшипников качения // Информационные системы и технологии. — НГТУ. 2015.
3. Автоматизированная система обработки и анализа виброакустических сигналов: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам / В. Гай [и др.]. — Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2015. — Свидетельство №2015618114 от 31.07.2015.
4. Li C. J., Wu S. On-line detection of localized defects in bearings by pattern recognition analysis // Journal of engineering for industry. — 1989. — Т. 111, № 4. — С. 331—336.
5. McFadden P., Smith J. Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique—a review // Tribology international. — 1984. — Т. 17, № 1. — С. 3—10.
6. A new procedure for using envelope analysis for rolling element bearing diagnostics in variable operating conditions / P. Borghesani [и др.] // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2013. — Т. 38, № 1. — С. 23—35.
7. Brotherton T., Pollard T., Jones D. Applications of time-frequency and time-scale representations to fault detection and classification // Time-Frequency and Time-Scale Analysis, 1992., Proceedings of the IEEE-SP International Symposium. — IEEE. 1992. — С. 95—98.
8. Lou X., Loparo K. A. Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference // Mechanical systems and signal processing. — 2004. — Т. 18, № 5. — С. 1077—1095.
9. Li H., Zheng H., Tang L. Wigner-Ville Distribution based on EMD for faults diagnosis of bearing // Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. — Springer, 2006. — С. 803—812.
10. Marwala T., Vilakazi C. B. Computational intelligence for condition monitoring // arXiv preprint arXiv:0705.2604. — 2007.
11. Junsheng C., Dejie Y., Yu Y. A fault diagnosis approach for roller bearings based on EMD method and AR model // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2006. — Т. 20, № 2. — С. 350—362.
12. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N. E. Huang [и др.] // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Т. 454. — The Royal Society. 1998. — С. 903—995.

Инв. № подл	Подл. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подл. и дата	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <span>ВКР-НГТУ-09.04.01-(М14 ИВТ-3)-002-2016 (ПЗ)</span> <span>Лист</span> </div>				
Ли	Изм.	№ докум.	Подл.	Дат	51				

