

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ**  
**УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**  
**(НГТУ)**

Институт радиоэлектроники и информационных технологий

Направление подготовки (специальность) 09.04.01 Информатика и вычислительная техника  
(код и наименование)

Направленность (профиль) образовательной программы Теоретическая информатика

(наименование)

Кафедра Вычислительные системы и технологии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

Магистра

(бакалавра, магистра, специалиста)

Студента Никифоров Н.А. группы М18 ИВТ-3

(Ф.И.О.)

на тему “Информационная модель и алгоритмы вибродиагностики ответственных  
(наименование темы работы)

узлов и механизмов автотранспортного средства”

**СТУДЕНТ:**



Никифоров Н.А.

(подпись)

(фамилия, и., о.)

03.07.2020

(дата)

**РУКОВОДИТЕЛЬ:**



Гай В.Е.

(фамилия, и., о.)

03.07.2020

(дата)

**РЕЦЕНЗЕНТ:**



Карпунин И.Г.

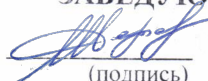
(подпись)

(фамилия, и., о.)

03.07.2020

(дата)

**ЗАВЕДУЮЩИЙ КАФЕДРОЙ**



(подпись)

(фамилия, и., о.)

03.07.2020

(дата)

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

1. По

(подпись)

(фамилия, и., о.)

(дата)

2. По

(подпись)

(фамилия, и., о.)

(дата)

3. По

(подпись)

(фамилия, и., о.)

(дата)

ВКР защищена

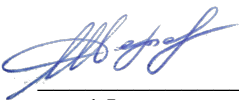
(дата)

протокол №

с оценкой

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ**  
**УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**  
**(НГТУ)**

Кафедра Вычислительные системы и технологии

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой  
Д.В. Жевнерчук  
  
«15» апреля 2020 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

**по направлению подготовки 09.04.01 Информатика и вычислительная техника**  
(код и наименование)

студенту Никифорову Николаю Андреевичу \_\_\_\_\_ группы М18-ИВТ-3  
(Ф.И.О.)

1. Тема ВКР

Информационная модель и алгоритмы вибродиагностики ответственных  
узлов и механизмов автотранспортного средства

(утверждена приказом по вузу от 07.04.2020 № 845/5 )

2. Срок сдачи студентом законченной работы \_\_\_\_\_

3. Исходные данные к работе

База вибросигналов, исследование должно быть выполнено с использованием  
теории активного восприятия, язык  
программирования R

4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень вопросов,  
подлежащих разработке)

Введение

Глава 1. Обзор существующих методов вибродиагностики

Глава 2. Информационная модель вибродиагностики ответственных узлов  
автотранспортного средства

Глава 3. Вычислительный эксперимент

Заключение

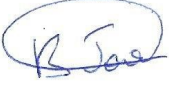
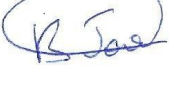
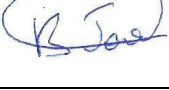
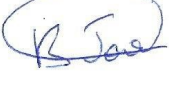
Список литературы


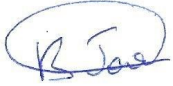

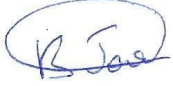
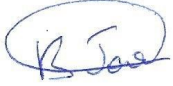
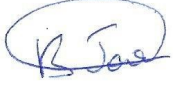
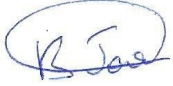
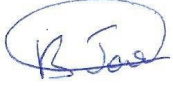
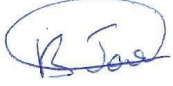
5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)  
структура системы, Информационная модель, структура этапа принятия решения,  
таблицы с результатами проведенного эксперимента


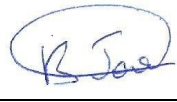
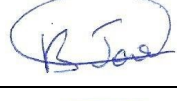
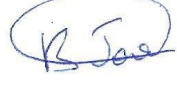
6. Консультанты по ВКР (с указанием относящихся к ним разделов)

Нормоконтроль Гай.В.Е.

7. Дата выдачи задания 07.02.2020

Код и содержание Компетенции	Задание	Проектируемый результат	Отметка о выполнении
ОК-1 способностью совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень	Выполнить исследование по теме алгоритмы вибродиагностики ответственных узлов атотранспортного средства	Результаты проведенных исследований, текст ВКР	
ОК- 2 способностью понимать роль науки в развитии цивилизации, соотношение науки и техники, иметь представление о связанных с ними современных социальных и этических проблемах, понимать ценность научной рациональности и ее исторических типов	Иметь представление о роли науки в современном обществе и научной рациональности	Понимание ценности научной рациональности при проведении исследования	
ОК- 3 способностью к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности	Изучение методов исследования в области вибродиагностики одномерных сигналов	Знание методов исследования в области вибродиагностики одномерных сигналов	
ОК-4 способностью заниматься научными исследованиями	Выполнить исследование на тему «Информационная модель и алгоритмы вибродиагностики ответственных узлов автотранспортного средства»	Результаты проведенных исследований, текст ВКР, научная новизна	
ОК- 5 использованием на практике умений и навыков в организации исследовательских и проектных работ, в управлении коллективом	Изучение принципов организации командной работы по разработке ПО	Понимание принципов организации командной работы по разработке ПО	
ОК- 6 способностью проявлять инициативу, в том числе в ситуациях риска, брать на себя всю полноту ответственности	Изучение рисков в разработке и ответственности разработчика	Понимание рисков в разработке и ответственности разработчика	
ОК- 7 способностью самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности	Разработка и использование моделей и методов для решения задачи вибродиагностики, использование информационных технологий (язык программирования R) при выполнении ВКР	Новые модели и алгоритмы, используемые для решения поставленной задачи, использованные информационные технологии, текст ВКР	
ОК-8 способностью к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов (в соответствии с целями магистерской программы)	Освоить использование программно-аппаратных комплексов для разработки ПО	Использование программно-аппаратных комплексов для разработки ПО	
ОК-9 умение оформлять отчеты о проведенной научно-исследовательской работе и подготавливать публикации по результатам исследования	Подготовка отчета по распределенной НИР. Оформление пояснительной записки и графических материалов по ВКР. Подготовка публикации для конференции ИСТ-2020	Текст отчета по распределенной НИР, текст пояснительной записки, текст публикации, графические материалы	

ОПК-1 способностью воспринимать математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания, умением самостоятельно приобретать, развивать и применять их для решения нестандартных задач, в том числе, в новой или незнакомой среде и в междисциплинарном контексте	Использовать математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для решения задач исследования	Использование математических, естественнонаучных, социально-экономических и профессиональных знания для решения задач исследования	
ОПК- 2 культурой мышления, способностью выстраивать логику рассуждений и высказываний, основанных на интерпретации данных, интегрированных из разных областей науки и техники, выносить суждения на основании неполных данных	Выполнение обзора и анализа методов вибродиагностики, выбор инструментов и методов сбора и обработки данных предметной области, анализ и интерпретация данных предметной области, предложение вариантов применения разработанных моделей и методов в других областях	Пояснительная записка к ВКР, выступление на защите ВКР	
ОПК-3 способностью анализировать и оценивать уровни своих компетенций в сочетании со способностью и готовностью к саморегулированию дальнейшего образования и профессиональной мобильности	Оценка результатов выполнения ВКР, анализ полученных результатов	Варианты дальнейшего развития исследования, отраженные в пояснительной записке	
ОПК-4 владением, по крайней мере, одним из иностранных языков на уровне социального и профессионального общения, способностью применять социальную лексику и профессиональную терминологию языка	Использование при выполнении ВКР литературы зарубежных авторов на английском языке	Список литературы с включенными в него зарубежными источниками	
ОПК-5 владением методами и средствами получения, хранения, переработки и трансляции информации посредством современных компьютерных технологий, в том числе, в глобальных компьютерных сетях	Использовать методы и средства получения, хранения, переработки и анализа информации в Internet	Использование методов и средств получения, хранения, переработки и анализа информации в Internet	
ОПК- 6 способностью анализировать профессиональную информацию, выделять в ней главное, структурировать, оформлять и представлять в виде аналитических обзоров с обоснованными выводами и рекомендациями	Составление обзора методов вибродиагностики, структурирование полученной информации, составление текста выступления на защите ВКР	Обзор методов вибродиагностики, текст пояснительной записки, текст и презентация выступления на защите ВКР	
ПК-1 знанием основ философии и методологии науки	Знание основ методологии научных исследований	Применение методов научных исследований	
ПК-2 знанием методов научных исследований и владение навыками их проведения	Изучение методов системного анализа при проведении исследования	Применение системного анализа при проведении исследования	
ПК- 3, знанием методов оптимизации и умение применять их при решении задач профессиональной деятельности	Выполнить подбор входных параметров разработанного алгоритма, обеспечивающих наибольшую точность классификации	Результаты вычислительного эксперимента в пояснительной записке	

ПК-4 владением существующими методами и алгоритмами решения задач распознавания и обработки данных	Изучение методов и алгоритмов решения задач обработки данных, полученных при исследовании	Применение методов и алгоритмов решения задач обработки данных, полученных при исследовании	
ПК-5 владением существующими методами и алгоритмами решения задач цифровой обработки сигналов	Изучение методов дискретизации сигналов во времени	Знание методов дискретизации сигналов во времени	
ПК-6 пониманием существующих подходов к верификации моделей программного обеспечения (ПО)	Изучение методов верификации ПО	Методы тестирования в пояснительной записке	
ПК-7 применением перспективных методов исследования и решения профессиональных задач на основе знания мировых тенденций развития вычислительной техники и информационных технологий	Использование методов цифровой обработки сигнала, теории активного восприятия, языка программирования R	Разработанные модели и алгоритмы, результаты вычислительного эксперимента, сравнение результатов с результатами аналогов	

Руководитель



В. Е. Гай  
(подпись)

Задание принял к исполнению 07.02.2020  
(дата)

Студент



Н. А. Никифоров  
(подпись)

**Примечания:**

1. Это задание прилагается к законченной работе и в составе пояснительной записки предоставляется в ГЭК.
2. До начала консультаций студент должен составить и утвердить у руководителя календарный график работы на весь период выполнения ВКР (с указанием сроков выполнения и трудоемкости отдельных этапов).



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ**  
**УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**  
**(НГТУ)**

**АННОТАЦИЯ**

**к выпускной квалификационной работе**

**по направлению подготовки 09.04.01 Информатика и вычислительная техника**

студента Никифорова Николая Андреевича группы М18-ИВТ-3  
по теме «Информационная модель и алгоритмы вибродиагностики ответственных узлов и механизмов автотранспортного средства»

Выпускная квалификационная работа выполнена на 57 страницах, содержит 16 диаграмм, 5 таблиц, библиографический список из 19 источников

Актуальность: С каждым годом количество автотранспортных средств в мире неуклонно растет. Согласно исследованиям, проведенным компанией Wizard Auto, начиная с 1950 года число автомобилей удваивается каждые десять лет. Соответственно с ростом числа автомобилей растет и количество ДТП из-за технических неисправностей. Одной из нагруженных деталей автотранспортного средства являются разнообразные подшипники качения. Подшипник качения – ответственный узел, использующийся для удержания подвижных конструкций. Данный вид механизма используется уже давно, но по статистике только 10% подшипников выходят из строя в результате естественных причин, остальные в результате неправильной установки или эксплуатации. Неожиданный выход из строя оборудования может нести более серьезные последствия, чем временные простои в производстве или задержки в обслуживании клиентов. Поломки могут становиться причиной гибели людей или невосполнимого урона окружающей среде. Это создает необходимость в своевременном обслуживании изношенных деталей механизмов. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что разработка новых моделей и методов для решения задачи вибродиагностики ответственных узлов и механизмов автотранспортного средства является актуальной.

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

Предмет исследования: Предметом исследования являются методы диагностики подшипников качения по вибросигналу

Цель исследования: Разработка и исследование новых моделей и алгоритмов решения задачи вибродиагностики ответственных узлов и механизмов автотранспортного средства.

Задачи исследования: обзор и анализ существующих известных методов решения задачи вибродиагностики ответственных узлов и механизмов автотранспортного средства; создание информационной модели описания вибросигнала с использованием теории активного восприятия; создание нового алгоритма формирования глобального

признакового описания изображения; проведение исследования с целью выявления наилучшей комбинации параметров разрабатываемой системы; проведение вычислительного эксперимента для установления корректности работы созданных моделей и алгоритмов.

Методы исследования: В ходе выполнения работы были использованы методы формирования признакового описания сигнала на основе теории активного восприятия, методы принятия решения о принадлежности сигнала к одному из классов на основе метода опорных векторов.

Структура работы: введение, три главы основной части, заключение, список литературы.

Во введении отражены актуальность выбранной темы, цель работы и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы, а также ее обоснованность и достоверность.

В 1 главе «Обзор существующих методов вибродиагностики» составлен обзор известных методов вибродиагностики, выявлены этапы решения этой задачи, а также проблемные места существующих методов.

Во 2 главе «Информационная модель вибродиагностики ответственных узлов автотранспортного средства» рассмотрены теоретические подходы к решению задачи вибродиагностики на всех ее этапах, предлагаемые разработанным методом.

В 3 главе «Вычислительный эксперимент» приведено описание вычислительного эксперимента, предназначенного для тестирования предлагаемого метода решения задачи, а также анализ результатов этого эксперимента.


В заключении обобщены результаты проделанной работы, сделаны выводы о достижении поставленной перед началом работы цели.

Выводы:

1. Разработанный метод вибродиагностики дает корректные результаты работы, является конкурентоспособным по сравнению с аналогами, может использоваться на практике.
2. Задачи, поставленные перед началом исследования, выполнены, цель работы достигнута.

Рекомендации:





1. Рекомендуются использование результатов работы при разработке моделей формирования признакового описания вибросигнала.
2. Рекомендуются использование результатов работы при создании систем вибродиагностики подшипников.

 / Никифоров  
подпись студента /расшифровка подписи

«1» июля 2020 г.

## Оглавление

Введение .....	5
Глава 1. Обзор существующих методов вибродиагностики. Постановка задачи .....	9
1.1 Структура систем вибродиагностики .....	9
1.2 Обзор существующих методов вибродиагностики подшипников качения .....	11
1.2.1 Метод на основе Мел-частотных кепстральных коэффициентов .....	10
1.2.2 Метод на основе вейвлет-преобразования и нечеткого вывода .....	12
1.2.3 Метод на основе метода эмпирических мод и авторегрессионной модели .....	14
1.2.4 Метод на основе локального среднего значения и частотно-временного анализа .....	24
1.3 Выводы по главе 1 .....	24
Глава 2. Информационная модель вибродиагностики ответственных узлов автотранспортного средства .....	26
2.1 Теория активного восприятия .....	26
2.2 Реализация системы вибродиагностики с использованием теории активного восприятия .....	30
2.2.1 Предварительная обработка сигнала .....	32
2.2.2 Формирование системы признакового описания .....	33
2.2.3 Принятие решения .....	34
2.3 Выводы по главе 2 .....	42
Глава 3. Вычислительный эксперимент .....	43
3.1 Описание эксперимента .....	43
3.2 Эксперимент .....	46
3.3 Результаты эксперимента .....	53
3.4 Вывод по главе 3 .....	50
Заключение .....	51
Список литературы .....	52

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Информационная модель и алгоритмы вибродиагностики ответственных узлов и механизмов автотранспортного средства			
Разраб.		Никифоров Н.А.		03.07				
Провер.		Гай В.Е.		03.07				
Н. Контр.		Гай В.Е.		03.07				
Утверд.		Жевнерчук Д.В.		03.07				
						Лит.	Лист	Листов
							4	56
						НГТУ им. Р.Е. Алексеева		



## Введение

С каждым годом количество автотранспортных средств в мире неуклонно растет. Согласно исследованиям, проведенным компанией Wizard Auto [1], начиная с 1950 года число автомобилей удваивается каждые десять лет. Соответственно с ростом числа автомобилей растет и количество ДТП из-за технических неисправностей. Одной из нагруженных деталей автотранспортного средства являются разнообразные подшипники качения. Подшипник качения – ответственный узел, использующийся для удержания подвижных конструкций. Данный вид механизма используется уже давно, но по статистике [2] только 10% подшипников выходят из строя в результате естественных причин, остальные в результате неправильной установки или эксплуатации. Неожиданный выход из строя оборудования может нести более серьезные последствия, чем временные простои в производстве или задержки в обслуживании клиентов. Поломки могут становиться причиной гибели людей или невосполнимого урона окружающей среде. Это создает необходимость в своевременном обслуживании изношенных деталей механизмов.

На данный момент вибродиагностика позволяет обнаружить следующий дефекты на подшипниках качения:

- неравномерный износ поверхностей качения колец и тел качения
- износ поверхностей скольжения сепаратора и защитных колец
- сколы, раковины, трещины на поверхностях качения
- дефекты сборки
- проскальзывание колец
- ухудшение качества смазки

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

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

- проблема формирования исходного описания
- проблема формирования системы признаков
- 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, разработка информационной модели и алгоритма вибродиагностики ответственных узлов автотранспортного средства, а также проведение 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.

### **Методы исследования**

В ходе выполнения работы были использованы методы формирования признаков описания сигнала на основе теории активного восприятия, методы принятия решения о принадлежности сигнала к одному из классов на основе метода опорных векторов.

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## **Положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся следующие положения:

- Информационная модель и алгоритм построения признакового описания сигнала, построенная на основе положений теории активного восприятия.
- Результаты вычислительного эксперимента

## **Научная новизна**

Научная новизна предлагаемого метода решения задачи вибродиагностики ответственных узлов и механизмов автотранспортного средства заключается в использовании нового способа формирования признакового описания сигнала на этапе формирования признакового описания. В данной работе, таким подходом является использование инструментария теории активного восприятия.

## **Теоретическая и практическая ценность**

Ценность работы состоит в разработке программного комплекса по анализу вибросигнала по разработанному методу диагностики подшипников качения. Данная система может быть использована для внедрения вибродиагностирования в различных транспортных средствах, использующих подшипники качения.

## **Апробация работы**

Апробация данной работы была проведена в ходе защиты отчета по распределенной научно-исследовательской работе, который включал в себя основные положения проведенного исследования и анализ полученных результатов, а также в ходе защиты публикации по данной работе на XXVI международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии - 2020».

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## Обоснованность и достоверность

Обоснованность и достоверность проведенного исследования доказываются корректным подходом к цифровой обработке сигналов и проведению вычислительных экспериментов. Полученные результаты исследования подтверждаются экспериментальными данными.

## Публикации

1. Н. А. Никифоров, В.Е. Гай – Информационная модель и алгоритмы вибродиагностики ответственных узлов и механизмов автотранспортного средства // Материалы XXVI международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии - 2020», ИСТ-2020, Россия, Н. Новгород, 2020г.

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

# Глава 1. Обзор существующих методов вибродиагностики. Постановка задачи

## 1.1 Структура систем вибродиагностики

Большая часть систем вибродиагностики включают в себя три основных этапа:

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

Предварительная обработка изображения является первым этапом в решении данной задачи. Цель этого шага заключается в представлении исходного сигнала в виде необходимом для формирования признакового описания по нему.

Наиболее сложный этап решения данной задачи - построение признакового описания сигнала. На данном этапе для сигнала формируется набор признаков, позволяющий однозначно описать дефект на данном сигнале. Цель этого этапа – создание системы признаков, опираясь на которую можно определить существование и характер повреждения подшипника с приемлемой погрешностью. Искомый набор признаков должен быть устойчив к помехам.

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

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

Схема описанных выше этапов решения задачи представлена на рисунке 1.1



Рисунок 1.1. Структура системы вибродиагностики



## 1.2 Обзор существующих методов вибродиагностики подшипников качения

Главным этапом считается создание системы атрибутов. Существующие методы вибродиагностики подразделяются на несколько типов, которые различают заданные характеристики во входном сигнале:

- частотные
- частотно-временные
- временные

Методы, основанные на частотных характеристиках сигнала, в основном анализируют высокочастотные участки и ищут повторения этих участков. Слабая частота сигнала может затруднить решение проблемы с использованием этого подхода. Основным недостатком такого подхода является тенденция к усреднению наблюдаемых характеристик, что приводит к снижению эффективности при появлении помех в наблюдаемом сигнале. Наиболее часто используемыми методами, основанными на этом подходе, являются:

- высокочастотный резонансный метод (HFRT) [3]
- метод анализа огибающей (envelope analysis) [4]

Использование частотно-временных характеристик в качестве описания признаков устраняет недостатки частотных методов путем наблюдения изменений частотных характеристик сигнала во времени. Самыми известными и популярными являются:

- оконное преобразование Фурье (STFT) [5]
- вейвлет-преобразование (WT) [6]
- преобразование Вигнера—Вилла (WVD) [7]

Методы, использующие временные характеристики сигнала, часто вводят характерные параметры, такие как пиковый уровень, стандартное отклонение значений, расчет ударного импульса, скользящее среднее и многие другие [8].

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

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

Для того чтобы создать систему определения состояния подшипников по методу, описанному в [9], мы использовали мел-частотные кепстральные коэффициенты. В качестве классификаторов тестируются следующие методы: метод опорных векторов (SVM), скрытая Марковская модель и расширенные нейронные сети.

#### Мел-частотные кепстральные коэффициенты

В области распознавания речи широко используется МЧКК. Причиной этого является их способность представлять динамические характеристики сигнала, они способны извлекать как линейные, так и нелинейные свойства сигнала. МЧКК - это тип вейвлета, частотные шкалы которого расположены на линейной шкале для частот менее 1 кГц и на логарифмической шкале для частот выше 1 кГц [18]. МЧКК весьма полезны для использования в целях идентификации вектора характеристик сигнала, так как они содержат как частотные, так и временные характеристики

Этапы вычисления следующие:

1. Быстрое преобразование Фурье, преобразование входного сигнала из временного представления в частотное

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

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:

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

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. Далее конвертируется логарифмический Мел спектр обратно в временное представление. Результат данного шага и подразумевают под 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.

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

В данном методе используются следующие методы обнаружения и классификации повреждений подшипников качения: вейвлет-преобразование-предварительная обработка и создание системы признаков; нечеткая нейроклассификация [6].

#### Вейвлет-преобразование

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

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

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:

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

Для получения представления сигнала в любой момент времени используется функция базового вейвлета (1.1), масштабируя ее и сдвигая.

Декомпозиция может быть определена итеративно, в результате чего сигнал разлагается на множество компонентов низкого разрешения. Этот подход называется вычислением дерева вейвлет-разложений. Чтобы получить составляющие сигнала на каждом уровне, необходимо использовать восстановительный фильтр и увеличить частоту дискретизации.

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

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

При анализе сигнала, на первой половине сигнала производится обучение, а на второй уже сам анализ, т.е. проверка работы метода. В данном методе, авторами используется вейвлет Добеши для анализа сигнала.

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

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

где элементы определяются формулой 1.4

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

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.



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

Метод, описанный в [11], определяет, что авторегрессионная модель (АМ) для формирования системы признакового описания неисправностей подшипников в диагностируемом сигнале является эффективным подходом. Чтобы определить тип повреждения, не нужно создавать математическую модель и изучать механизм отказов системы. Но в то же время АМ модель применима только к стационарным сигналам, которым вибрационный сигнал, полученный во время работы подшипника, не является. Метод эмпирических мод призван решить эту проблему путем предварительной обработки нестационарного сигнала в ряд внутренних колебаний (мод), которые являются стационарными. В результате, АМ модель может быть применена к каждой моде, что и рассматривается как вектор признаков. Расстояние Махаланобиса используется для определения состояния и классификации неисправности подшипника.

#### МЭМ метод

Исследователи предположили, что любой сигнал состоит из различных простых внутренних колебаний (мод). На основе этого предположения был разработан метод МЭМ [12]. 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 на ряд мод, каждая из которых должна удовлетворять следующим условиям:

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

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

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

1. определить все локальные экстремумы
2. соединить все локальные максимумы кубической сплайновой линией в качестве верхней огибающей
3. соединить все локальные минимумы кубической сплайновой линией в качестве нижней огибающей
4. среднее значение верхней и нижней огибающих обозначается как  $m_1$ , а разность между сигналом  $x(t)$  и  $m_1$  является первым компонентом  $h_1$ :

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

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

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

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

Рассматриваем  $r_1$  как оригинальный сигнал и вышеописанные процессы повторяются, следовательно может быть получена вторая мода  $c_2$ . Повторяя вышеописанные этапы  $n$ -ое количество раз можно получить столько же мод исходного сигнала. Когда  $r_n$  становится монотонной функцией из которой невозможно следующее извлечение мод, следовательно разложение должно быть остановлено.

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

На основе вышеописанных этапов можно выделить следующее:

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

Каждая из полученных мод включает в себя различные диапазоны частот от высокого до низкого и находится в статическом состоянии.

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

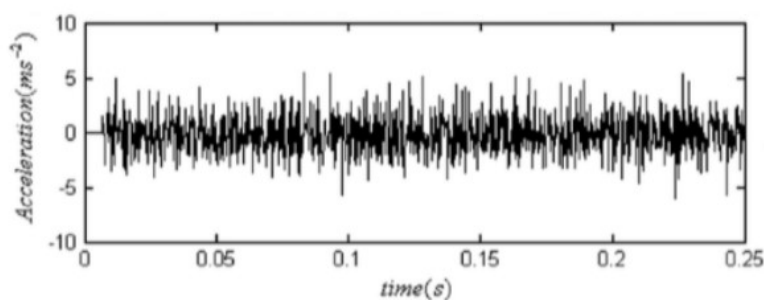


Рисунок 1.2 — Вибрационный сигнал подшипника качения с повреждением наружного кольца

Моды отображены на рисунке 1.3

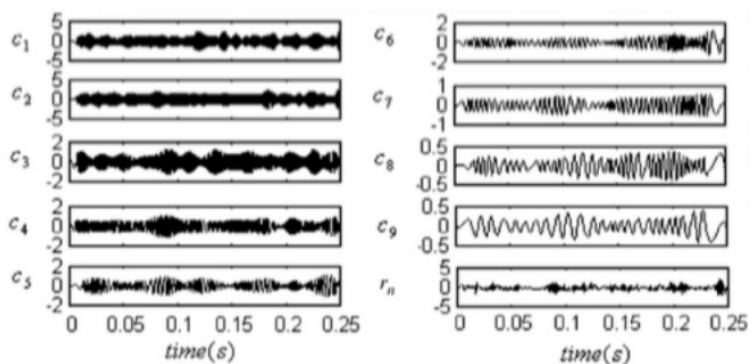


Рисунок 1.3 — Результат декомпозиции вибрационного сигнала подшипника качения, изображенного на рис. 1.2.

Из рисунка 1.3 можно сделать вывод, что каждая мода определяет множитель в конкретный момент времени.

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

Для применение вышеописанного метода полагается. Что сигнал подшипника качения  $x(t)$  уже был разложен используя МЭМ на  $n$  мод  $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$ , где информацию о характеризующем множителе предоставляет каждая мода. 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].

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

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

$$d_{j,i} = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left( \frac{\varphi_{x,ik} \neg \varphi_{ik}}{D[\varphi_i]} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{x,i}^2 \neg \sigma_i^2}{D[\sigma_i^2]} \right)^2}$$

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

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

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.

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

В методе, описанном в работе [16], строятся осциллограмма и энергетический спектр вибрационного сигнала. Далее распределение плотности энергии сигнала находят с помощью прямого частотно-временного анализа эмпирических мод и функции произведения (ФП). Набор мод получается путем декомпозиции сигнала с использованием модифицированного метода эмпирических мод, рассмотренных в 1.2.3-ММЭМ. После декомпозиции исходного сигнала методом локального среднего получается производственная функция. Наконец, в соответствии с распределением плотности энергии сигнала повреждение подшипника качения диагностируется с помощью оконного преобразования Фурье.

#### Принцип декомпозиции ММЭМ

Принцип ММЭМ [17] заключается в использовании гауссового шума, который имеет нормальное распределение значений сигнала. Добавленные шумы взаимно компенсируют друг друга, а эмпирические моды остаются в заданных пределах, что значительно снижает вероятность 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.
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.

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

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

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22



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

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 способа, описанного в работе [18], заключается в выделении частотной модуляции и огибающей сигнала из исходного сигнала, умножение которых позволяет 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  $a_{11}(t)$

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 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.

$$\begin{cases} u_1(t) = x(t) - p_1(t) \\ u_2(t) = x(t) - p_2(t) \\ u_k(t) = x(t) - p_k(t) \end{cases}$$

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

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

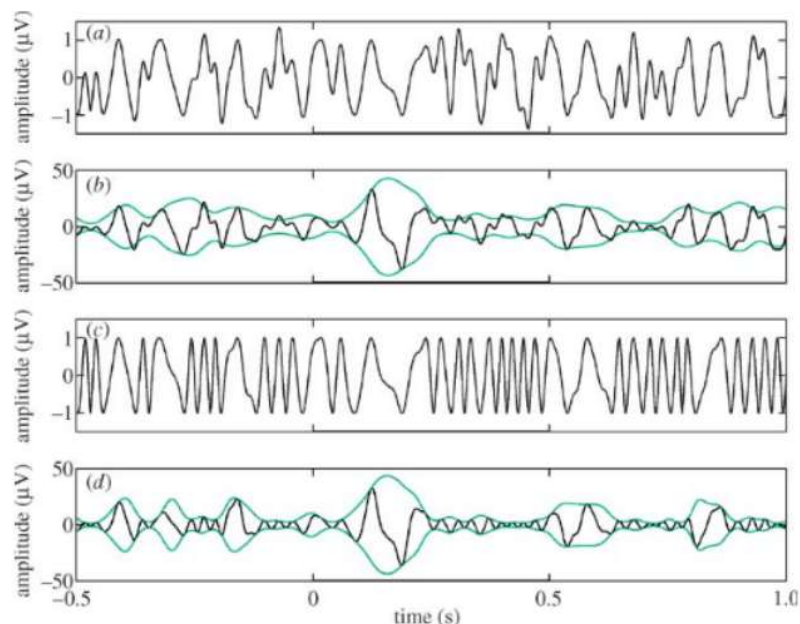


Рисунок 1.4 — Первоначальная частотная модуляция сигнала(a), первоначальная производящая функция и первоначальная расчетная функция огибающей(b), итоговая частотная модуляция сигнала(c), итоговая производящая функция и соответствующая огибающая(d)

Основная идея этого подхода заключается в использовании оконной функции для получения части сигнала. Предполагается, что сигнал в окне находится в стационарном состоянии [19]. Полученный сигнал анализируется с помощью преобразования Фурье для определения частотных составляющих в окне. Затем функция окна перемещается вдоль временной оси сигнала, чтобы получить изменение частоты с течением времени. Это называется частотно-временным распределением. Оконное преобразование Фурье можно определить по следующей формуле:

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

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

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

Как видно из формул, этот метод вычисляет частотный спектр путем сдвига окна. При этом временные и частотные разрешения ограничены принципом неопределенности Гейзенберга. Другими словами, используя более узкое окно, вы можете получить более высокое временное разрешение, но частотное разрешение будет хуже, поэтому, используя более широкое окно, вы можете получить более высокое частотное разрешение, но более слабое временное.

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

### 1.3 Выводы по главе 1

Данная глава содержит в себе краткий обзор существующих методов диагностирования состояния подшипников качения.

Обзоры включают в себя основные аспекты и способы обработки вибросигналов и способы выявления характеристик сигнала применяемы при решении задачи. Большое количество работ по данной тематике подтверждает актуальность решаемой задачи и данного исследования в целом.

Базируясь на обзоре существующих методов, рассмотренных в данной главе можно прийти к выводу о существовании проблем в решении поставленной задачи:

- проблема формирования исходного описания: описывает узконаправленность существующих методов решения и требуют знания свойств анализируемого сигнала
- проблема формирования признакового описания сигнала: описывает проблему выбора множества признаков, которые бы однозначно и достаточно описывали анализируемы сигнал
- проблема принятия решения: описывает проблему, заключающуюся в сравнении с имеющимся эталоном признакового описания анализируемого вибросигнала. Помехи и другие изменения сигнала, относящегося к определенному классу могут привести к перекрытию этих классов. Следовательно, данная проблема коррелирует с проблемой формирования признакового описания, позволяющей сформировать систему признаков качественно и однозначно описывающую эталонные образцы.

В данной работе предложен новый подход к решению вышеописанных проблем. Использование Теории активного восприятия (ТАВ) для построения системы признаков позволит сократить размерность входного описания и однозначно описать анализируемы сигнал.

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Теоретические аспекты предлагаемого алгоритма вибродиагностирования состояния ответственных узлов автотранспортного средства на основе теории активного восприятия более подробно будут рассмотрены в главе 2.

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28



## Глава 2. Информационная модель вибродиагностики ответственных узлов автотранспортного средства

Предлагаемый метод вибродиагностики ответственных узлов и механизмов автотранспортного средства сводится к вибродиагностике подшипников качения. Он основывается на теории активного восприятия (ТАВ) на этапе предварительной обработки сигнала и этапе формирования системы признаков. На этапе принятия решения применяется метод опорных векторов.

### 2.1 Теория активного восприятия

Изначально ТАВ использовалась для анализа изображений, но была впоследствии адаптирована для применения к сигналу. Теория активного восприятия решает задачу первых двух этапов системы распознавания – предварительная обработка и формирование системы признаков описания. Базовым преобразованием в теории активного восприятия является  $U$ -преобразование, которое заключается в последовательных операциях интегрирования и дифференцирования, применяемых к анализируемому сигналу.

Далее рассматривается процесс вычисления  $U$ -представления тестового сигнала.

На первом этапе (этап предварительной обработки сигнала) производится процесс интегрирования. Сигнал разбивается на части, амплитуды отсчётов, которые отнесены к каждой части, складываются, в результате генерируется вектор частичных сумм  $S$ .

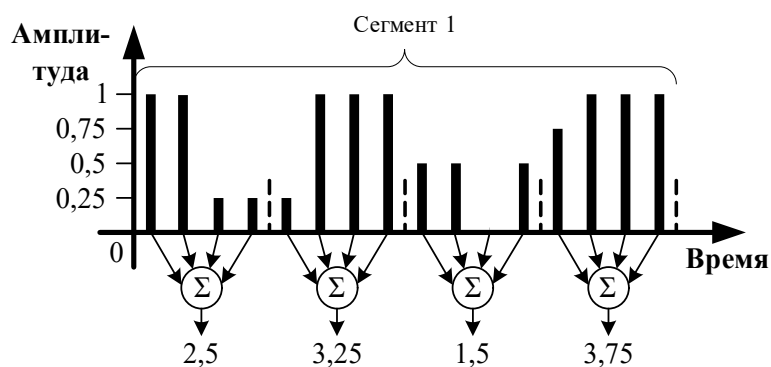


Рисунок 2.1 – Интегрирование сигнала

Следующим этапом является дифференцирование. На этом этапе на вектор частичных сумм  $S$  применяются фильтры (рисунок 2.2) путем перемножения. Как результат данного преобразования вычисляется вектор спектральных коэффициентов.

Этих преобразования являются базами в Теории активного восприятия.

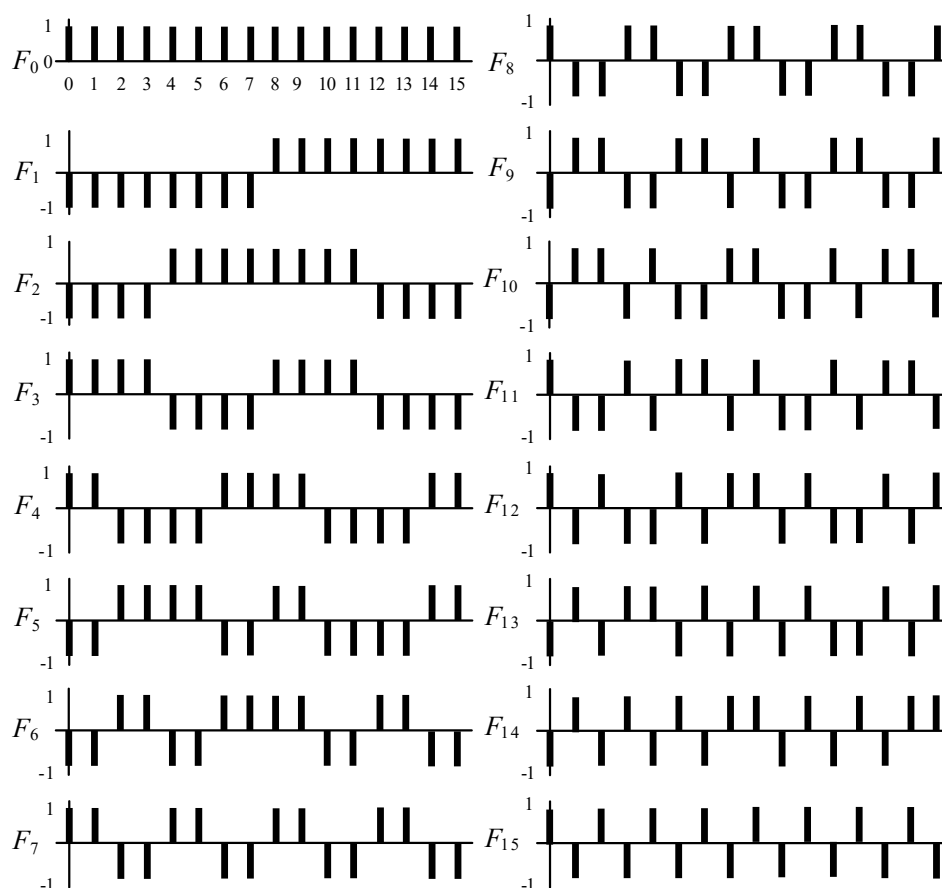


Рисунок 2.2 – Фильтры

## Алгебра групп

Алгебра групп является немаловажно частью ТАВ. 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.

В ТАВ каждому фильтру  $F_i$  ставится в соответствие бинарный оператор  $V_i$ . Это преобразование происходит следующим образом: фильтрам (рисунок 2.2) ставится соответствие  $(+1 \rightarrow 1)$ ,  $(1 \rightarrow 0)$ . В результате получается набор операторов, изображенных на рисунке 2.3.

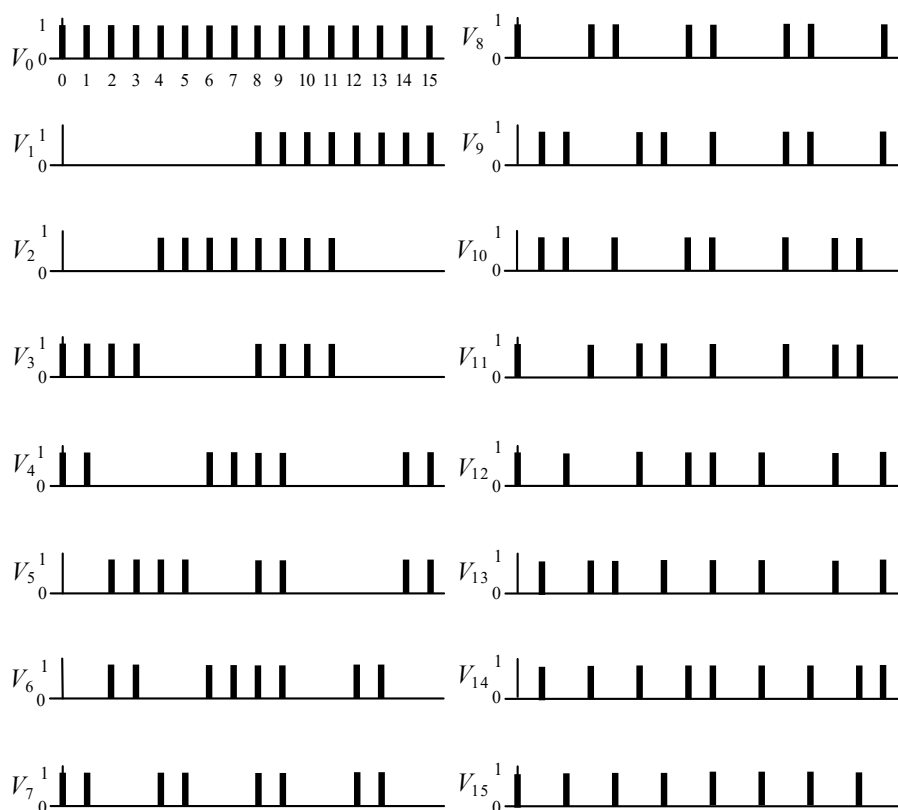


Рисунок 2.3 – Операторы

Алгоритм генерации полных групп заключается в следующем: перебираются все возможные сочетания троек операторов  $V_i$ ,  $V_j$ ,  $V_k$ ; три оператора составляют полную группу, если  $V_i + V_j + V_k \equiv e_1$ .

Примечание: оператор  $V_0$  в переборе не участвует. Также стоит отметить что выделяют полные группы на сложении и умножении. Для отнесения полной группы к сложению или умножению необходимо пройти следующие этапы:

1. Определяется количество инверсных операторов: если значение  $j$ -го элемента спектра меньше нуля, то считается, что соответствующий элементу оператор – инверсный
2. Число инверсных операторов чётно: вычисляется образ полной группы на операции умножения. Число инверсных операторов нечётно: вычисляется образ полной группы на операции сложения.

С учётом всех инверсий, существует 140 полных групп на операции сложения и 140 групп на умножении.

Алгоритм генерации замкнутых групп заключается в следующем: перебираются все возможные сочетания троек операторов  $V_i, V_j, V_k, V_l$ , четыре оператора составляют замкнутую группу, если:

1. любые три оператора из четырёх, составляющих замкнутую группу, не образуют полную группу (операторы рассматриваются без инверсий);
2. сумма четырёх прямых операторов не составляет единицу ( $e_1$ , единичный вектор);
3. пусть  $N$  – число операторов, тогда образ замкнутой группы (число инверсий операторов нечётно, т.е. образ строится с нечётным числом операторов), включает  $((1 / 2) \cdot N)$  нулей и  $((1 / 2) \cdot N)$  единиц.

Аналогично полным группам замкнутые разделяются на группы на операции сложения и на операции умножения.

С учётом всех инверсий, существует 840 замкнутых групп на операции сложения и 840 групп на умножении.

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

## 2.2 Реализация системы вибродиагностики с использованием теории активного восприятия

Задача вибродиагностики делится на три основных этапа:

- Предварительная обработка
- Формирование признакового описания
- Принятие решения

На вход системы поступает сигнал, к которому применяется предварительная обработка и формируется признаковое описание. По сформированному признаковому описанию классификатор принимает решение о принадлежности входного сигнала к одному из классов. Информационная модель приведена на рисунке 2.4.

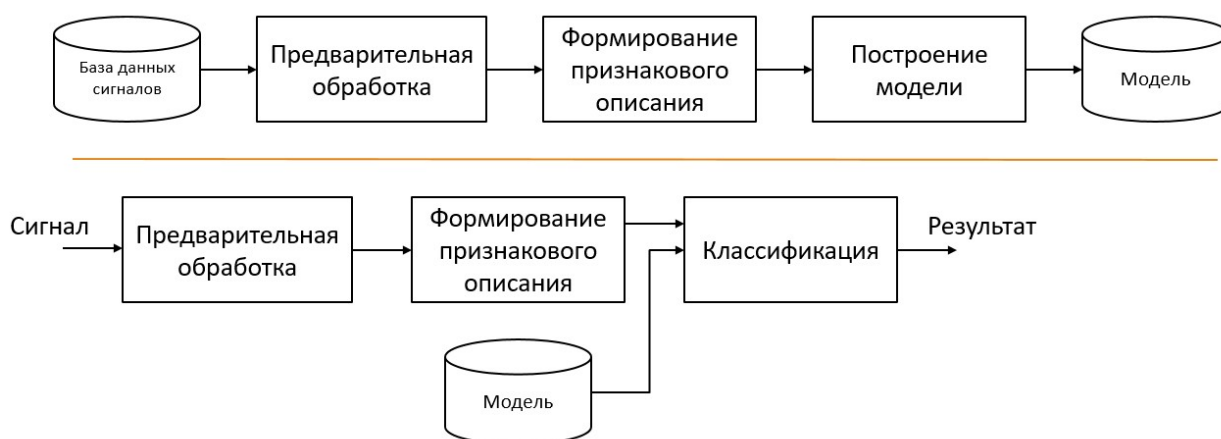


Рисунок 2.4 – Информационная модель

Более подробная структура этапа принятия решения представлена на Рисунке 2.5. На нем продемонстрировано, что этап принятия решения основан на методах ансамблей. Теоретическая составляющая ансамблей будет описана далее.

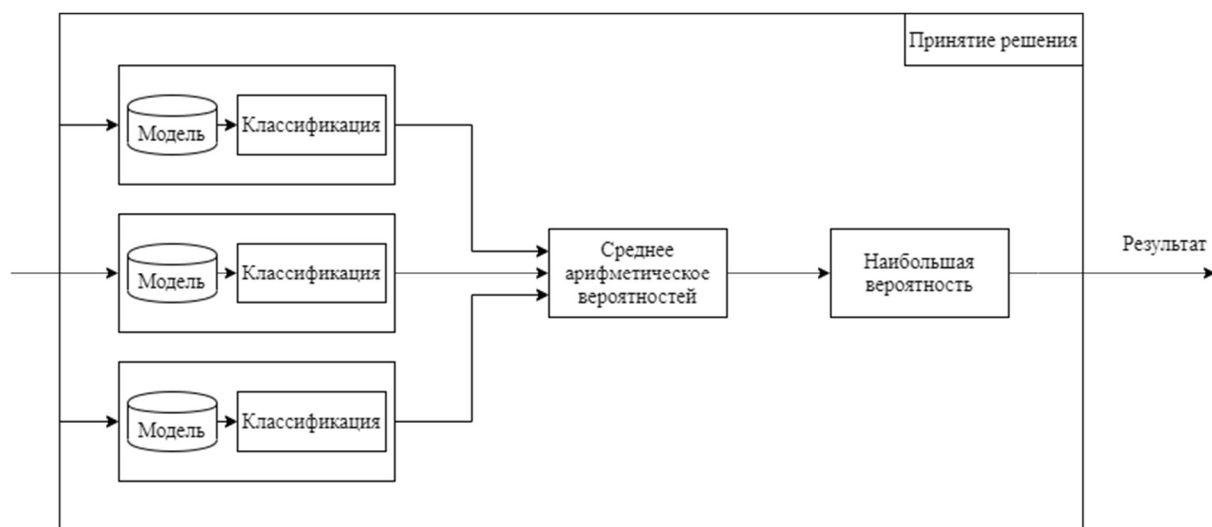


Рисунок 2.5 – Структура этапа принятия решения

### 2.2.1 Предварительная обработка сигнала

На этапе предварительно обработки происходит нормирование сигнала, а затем к нему применяется Q-преобразование. Оно заключается в применении сложения сегментам исходного сигнала.

Входной сигнала представляется в виде множества сегментов этого сигнала с частичным перекрытием. Далее к каждому сегменту применяется Q-преобразование. Происходит это путем разбиения сегмента сигнала на 16 частей и суммирование значений амплитуд каждой части (Рисунок 2.5). В результате на этом этапе для каждого сегмента формируется 16 частичных сумм.

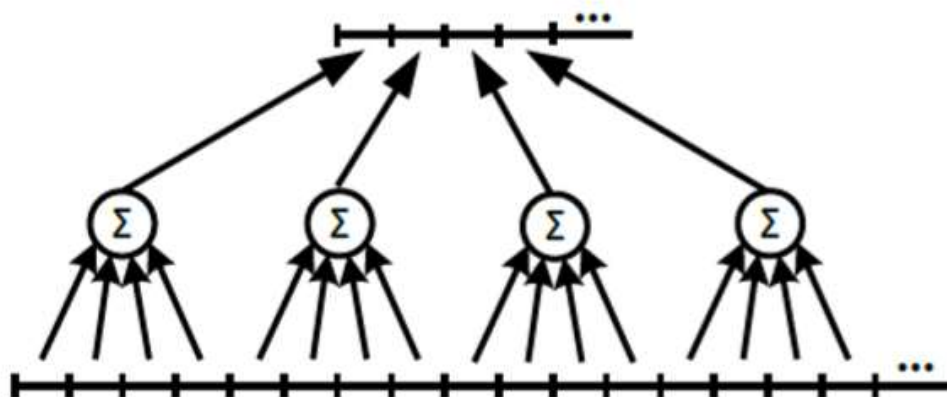


Рисунок 2.6 – Q-преобразование

### 2.2.2 Формирование системы признакового описания

На данном этапе происходит формирование признакового описания сигнала, с помощью которого было бы возможно однозначно описать сигнал и впоследствии его классифицировать.

Алгоритм формирования признакового описания состоит из следующих шагов:

1. На вход данного шага поступает результат предварительной обработки сигнала. Для каждого сегмента на последовательность частичных сумм применяются фильтры Уолша системы Хармута, в результате чего для каждого сегмента сигнала формируется вектор спектральных коэффициентов.

2. Каждой ненулевой компоненте вектора спектральных коэффициентов можно поставить в соответствие оператор  $V_i$ . На множестве операторов формируется алгебра групп анализируемого сигнала – семейство полных. В результате данного шага для всего сигнала формируется гистограмма полных групп (140 элементов).

3. На данном шаге формирования признакового описания к гистограмме полных групп применяются фильтры Уолша системы Хармута. В результате данного шага происходит переход от размерности 140 к  $N$ , где  $N$  размер фильтров. Таким образом результатом этапа формирования системы признаков является массив признаков, полученный с помощью операции  $U$ -преобразования, а также с помощью вычисления полных групп на основе  $U$ -преобразования.



### 2.2.3 Принятие решения

Этап принятия решения о принадлежности сигнала к одному из классов реализуется с помощью классификатора. Для того чтобы эффективно добиться наилучшего результата необходимо грамотно подобрать метод классификации и обучить сам классификатор.

#### 2.2.3.1 Классификатор

Метод опорных векторов считается мощным и достаточно широко используемым алгоритмом решения задач классификации. Это достигается за счет его достаточно хорошей способности обобщения данных. Целью метода является поиск такой гиперплоскости в  $N$ -мерном пространстве ( $N$  - число признаков), которая четко классифицирует точки данных. Для разделения двух классов существует достаточно много плоскостей для однозначного разделения. Главной целью является найти именно ту плоскость, которая имеет максимальный отступ, то есть максимальное расстояние между точками обоих классов. Максимальное расстояние может обеспечить в дальнейшем более высокую точность на тех данных, которых не было в обучающей выборке. На рисунке 2.6 представлены возможные плоскости, разделяющие два класса.

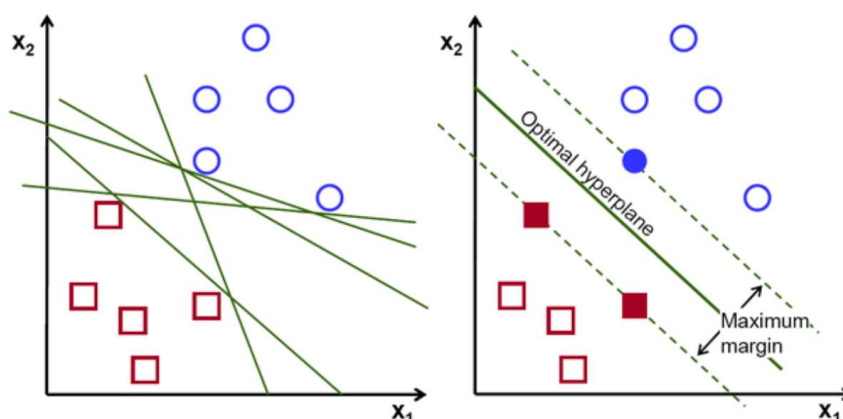


Рисунок 2.7 – Возможные гиперплоскости

Гиперплоскости - это своеобразные границы принятия решений, которые обеспечивают разделение данных различных классов. Точки (данные), попадающие по разные стороны от гиперплоскости, соответствуют к разным

классам. От количества признаков описывающих данные в обучающей выборке зависит и размерность гиперплоскости. Соответственно при количестве входных объектов равным 2, гиперплоскость будет является линейно зависимой. Если количество входных объектов равно 3, то гиперплоскость становится уже двумерной.

Опорными векторами называют те точки, которые располагаются ближе к разделяющей гиперплоскости чем и оказывают влияние на ее положение и ориентацию. По данным векторам и происходит максимизация отступа классификатора. Изменение положения или удаление данных векторов может кардинально изменить положение гиперплоскости.

Метод опорных векторов строит классифицирующую функцию  $F$  в виде

$$F(x) = \text{sign}(\langle w, x \rangle + b)$$

где  $\langle , \rangle$  — скалярное произведение,  $w$  — нормальный вектор к разделяющей гиперплоскости,  $b$  — вспомогательный параметр. Те объекты, для которых  $F(x) = 1$  попадают в один класс, а объекты с  $F(x) = -1$  — в другой.

Задача классификатора состоит в выборе таких  $w$  и  $b$  которые максимизируют расстояние до каждого класса.

### 2.2.3.2 Ансамблевое обучение

Ансамблевое обучение - это парадигма машинного обучения, при которой несколько моделей, таких как классификаторы или эксперты, стратегически объединяются для решения конкретной вычислительной задачи. Основной целью данной парадигмы является создание такого набора «слабых учеников», что при совместной работе выдавался лучший результат.

Причины использования ансамблей:

1. Статистическая. Парадигма ансамблевого обучения позволяет «усреднить» ошибку каждого из «слабых учеников».
2. Вычислительная. Ансамбль моделей имеет большую вероятность найти глобальную гиперплоскость разделяющую базовые классы.
3. Репрезентативная. Расширение множества общих гипотез за счет комбинирования множеств «слабых учеников»

#### Бэггинг

Одним из методов ансамблевого обучения является бэггинг. Основной идеей данного метода является подбор нескольких независимых друг от друга моделей и «усреднение» их прогнозов с целью получения общей модели обладающей меньшей дисперсией. Стоит отметить что на практике подобрать полностью независимые модели достаточно сложно, потому что для этого требуется слишком большой набор данных.

Разделение данных для моделей происходит в равном порядке (Рисунок 2.7)

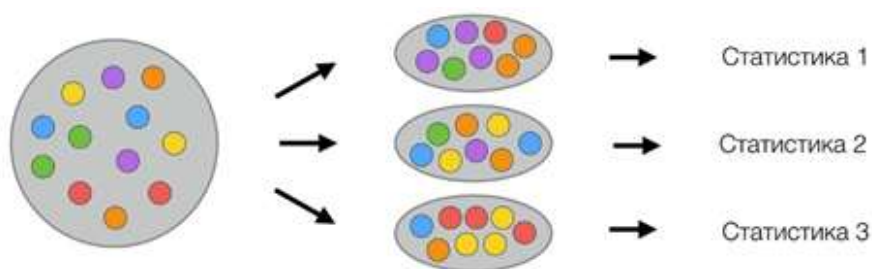


Рисунок 2.8 – Разделение данных

## Бустинг

Отличительной чертой бустинга от бэггинга является параллельное обучение базовых моделей. Следствием этого является несоразмерные друг перед другом выборки. Идея данного подхода состоит в обучении последующей модели на результатах предыдущей. Таким образом в результате получается несколько «слабых учеников», которые компенсируют недостатки друг друга.

На Рисунке 2.9 продемонстрирован процесс обучения ансамбля моделей, основанный на бустинге.

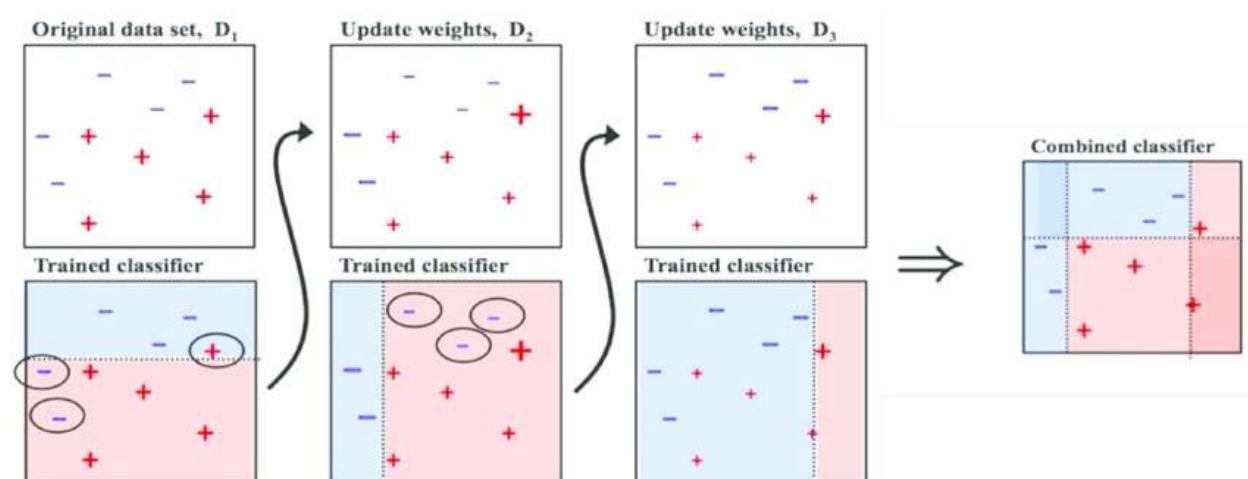


Рисунок 2.9 – Бустинг

## Стекинг

В отличие от бэггинга и бустинга стекинг основан на применении разнородных моделей. Это означает, что алгоритмы обучения «слабых» учеников различны., в то время как бэггинг и бустинг используют только однородных «слабых» учеников. Также немаловажной особенностью стекинга является способ объединения результатов базовых моделей. Для этого используется дополнительная обученная метамодель на вход которой поступают результаты «слабых» учеников. Идея стекинга продемонстрирована на Рисунке 2.10.

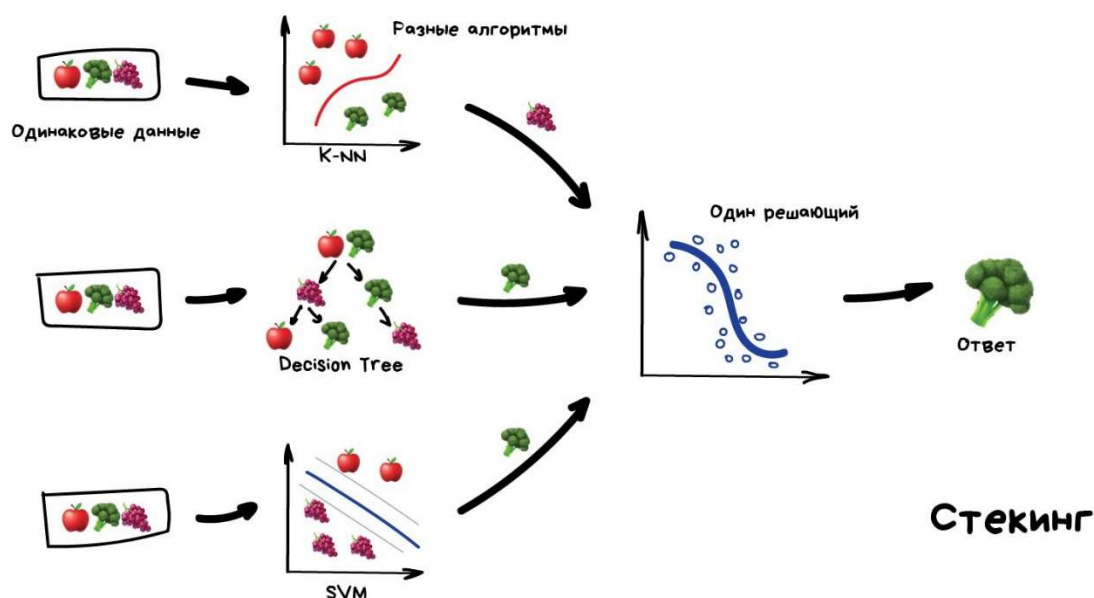


Рисунок 2.10 – Стекинг

## Объединение результатов

Существует несколько возможных способов объединения нескольких моделей.

1. Усреднение выходных данных. Подходит для задачи регрессии выходные данные отдельных моделей могут быть буквально усреднены
2. Жесткое голосование. В задачах классификации, класс, который получает большинство голосов, возвращается моделью ансамбля.

3. Мягкое голосование. В задачах классификации, можно рассмотреть вероятности каждого класса, возвращаемые всеми моделями, усреднить эти вероятности и сохранить класс с самой высокой средней вероятностью.

4. Метамодель. В задачах классификации обучается дополнительная модель на вход которой поступают результаты «слабых» учеников. Данная модель и выдает результат для всего ансамбля

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

### 2.2.3.3 Гиперпараметры

В практике машинного обучения гиперпараметры модели - это свойства обучающих данных, которые будут изучаться самостоятельно во время обучения классификатором или другой моделью. Например, веса и смещения или точки разделения в дереве решений.

Гиперпараметры модели - это свойства, которые управляют всем процессом обучения. Они включают переменные, определяющие структуру сети (например, количество скрытых блоков), и переменные, определяющие, как сеть обучается (например, скорость обучения). Гиперпараметры модели задаются перед обучением (перед оптимизацией весов и смещений).

В различных модификациях известных алгоритмов авторы могут использовать специфические гиперпараметры.

Одни и те же типы моделей машинного обучения могут требовать различных весов или скоростей обучения для различных типов данных. Эти характеристики именуются гиперпараметрами и обязаны быть сконфигурированы таким образом, дабы модель имела возможность нормально оптимально решать задачу обучения. Для этого требуется найти кортеж гиперпараметров, который выдает лучшую модель, оптимизирующую заданную функцию потерь по заданным независимым данным. Целевая функция принимает кортеж гиперпараметров и возвращает соответствующие потери. Перекрестная проверка часто используется для оценки этой обобщающей способности.

#### Поиск по сетке

Поиск по сетке - это подход к настройке гиперпараметра, который будет методично строить и оценивать модель для каждой комбинации параметров алгоритма, указанных в сетке. При использовании данного метода необходимо производить оценку производительности обучаемого алгоритма с целью подбора оптимальных параметров. Данная оценка обычно производится посредством перекрестной проверки обученной модели на

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

тестовой выборке из общего набора данных или на отдельном наборе данных не входящем в общий.

Стоит отметить, что при данном методе подбора гиперпараметров осуществляется ручная установка границ поиска.

Главным недостатком данного подхода является так называемое проклятье размерности, из-за которого страдает скорость обучения. Но так как гиперпараметрические величины с которыми алгоритм работает, не зависят друг от друга, то алгоритм поиска по сетке может быть распараллелен.

### **Случайный поиск**

В отличии от поиска по сетке случайный поиск исключает полный перебор всех комбинаций и заменяет его на выборку их случайным образом. Итоговый результат полученный методом случайного поиска может быть лучше результата, полученного поиском по сетке в том случае если не все гиперпараметры оказывают достаточное влияние на алгоритм обучения.

Случайный поиск также легко параллелизуемая и, кроме того, позволяют использовать предварительные данные путём указания распределения для выборки случайных параметров.

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44



### 2.3 Выводы по главе 2

В данной главе были описаны теоретические аспекты системы вибродиагностики ответственных узлов автотранспортного средства. В данной главе также представлены варианты реализации каждого из этапов анализа вибросигнала. Также 2-я глава посвящена описанию формирования системы признакового описания основанной на теории активного восприятия, что освещает научную новизну данной работы. Описан алгоритм принятия решения, основанный на применении метода опорных векторов и ансамблей моделей. Рассмотрены типы ансамблей для решения задачи классификации и объединения результатов «слабых» учеников.

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

### Глава 3. Вычислительный эксперимент

Вычислительный эксперимент является неотъемлемой частью по разработке алгоритма вибродиагностики ответственных узлов и механизмов автотранспортного средства. По его результатам делается вывод об обоснованности разработанного алгоритма и применимости его для решения поставленной задачи на практике. Данная глава посвящена описанию проведенного вычислительного эксперимента и анализу его результатов.

#### 3.1 Описание эксперимента

Вычислительный эксперимент был проведен основываясь на данных опубликованных в [14]. В представленной базе данных записан сигнал, полученный с акселерометров, установленных:

- на корпусе двигателя в месте подключения нагрузки
- на вентиляторе
- на поддерживающей установке

Фотография и схематическое изображение экспериментального стенда представлены на Рисунок 3.1 и Рисунок 3.2. Также представленный набор сигналов содержит сигналы вибрации с искусственным повреждением подшипников качения:

- на внешней дорожке
- на внутренней дорожке
- на катящемся кузове.

Соответственно каждый дефект имеет свой размер(диаметр). В данном наборе данных представлены дефекты 3 диаметров: 0.18, 0.36, 0.53 мм. Таким образом, было принято решение о том, что классификация будет производиться по размерам дефекта:

1. 0.18
2. 0.36
3. 0.53

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

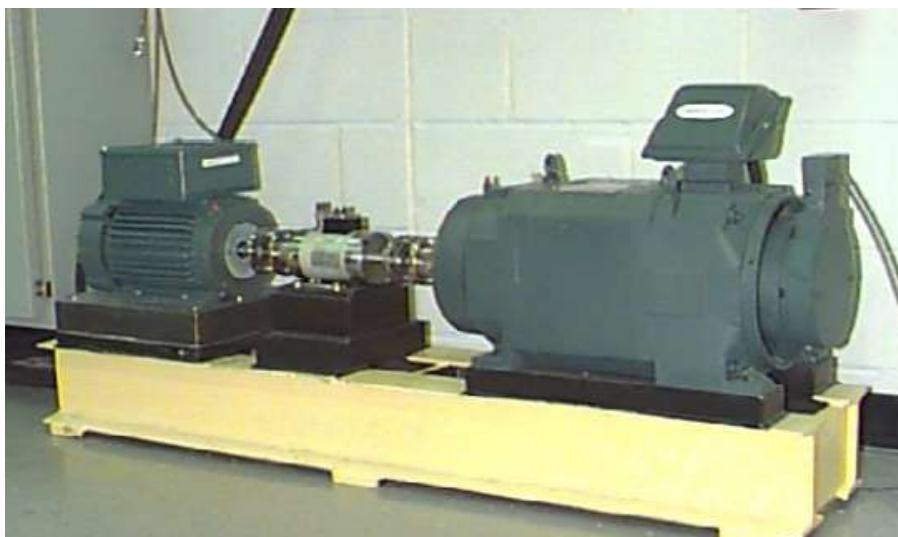


Рисунок 3.1 – Тестовый стенд для записи вибросигнала

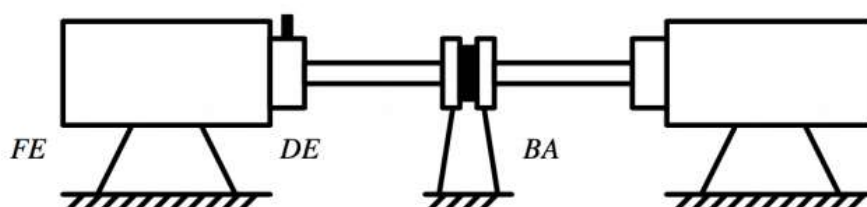


Рисунок 3.2 — Схематичное изображение тестового стенда

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

В рамках данной работы была проведена серия экспериментов по проверке практической эффективности предложенного метода вибродиагностики. В этой главе представлены несколько результатов тестирования, которое было проведено на ноутбуке со следующими характеристиками:

- процессор: Intel Core i5 2,4 ГГц
- оперативная память: 8 ГБ.

Предложенный алгоритм вибродиагностики реализован в программной среде RStudio на языке программирования R. Произведенные эксперименты использовали сигнал записанный акселерометром с частотой дискретизации 12 кГц.

Таблица 3.1 — Результаты работы методов вибродиагностики рассмотренных в [15]

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

### 3.2 Эксперимент

В эксперименте в качестве массива признаков использовались полные группы на сложении основанные на теории активного восприятия, которые более подробно описывались в главе 2. В качестве одномерных фильтров применяемых к гистограмме полных групп в сигнале были выбраны 32-х размерные одномерные фильтры. Таким образом для каждого входного сигнала получается массив из 32 элементов что является признаковым описание данного сигнала.

Также стоит отметить, что этап принятия решения основан на обученной модели классификатора. В целях обучения и дальнейшего анализа исходная база сигналов, включающая в себя 550 экземпляров, была разделена на две части:

- 80% на обучение модели классификатора
- 20% на тестирование результатов работы

В результате получается не очень большое количество данных для обучения модели классификатора. Следовательно, необходимо предпринять шаги по возможному улучшению работы классификатора. Одним из таких решений является бэгинг. Данный подход подразумевает разделение данных на несколько равных частей и обучение на них моделей классификатора, речь о данном подходе более подробно шла в главе 2. Таким образом, исходный набор данных для обучения был разделена на 3 части, т.е. в результате получилось 3 «слабых» ученика. Для объединения результатов трех классификаторов было принято решение воспользоваться принципом «мягкого голосования», решение принимается путем усреднения вероятностей для каждого класса от каждого классификатора.

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

Для улучшения точности работы классификатора проводится оптимизация гиперпараметров для каждого «слабого ученика». Оптимизация производится методом поиска по сетке, подробно о котором описано в главе 2.

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

### 3.3 Результаты эксперимента

Для тестирования работоспособности системы на ее вход подаются те сигналы из базы данных, которые не входили в обучающую выборку.

Результаты классификации каждым из «слабых учеников» приведены в Таблице 3.2, Таблице 3.3, Таблице 3.4 в качестве нормализованных матриц ошибок.

Таблица 3.2 – Результат работы 1-го «слабого ученика»

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
1	0.73	0.19	0.08
2	0.05	0.65	0.3
3	0.04	0.14	0.82

Таблица 3.3 – Результат работы 2-го «слабого ученика»

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
1	0.72	0.21	0.07
2	0.22	0.65	0.13
3	0.09	0.11	0.8

Таблица 3.4 – Результат работы 3-го «слабого ученика»

	1	2	3
1	0.75	0.19	0.06
2	0.14	0.77	0.09
3	0.09	0.09	0.82

В качестве метрики оценки работы классификаторы и системы в целом было принято решение использовать метрику точности.

В результате вычисления данной метрики для всех трех «слабых учеников» были получены следующие значения: 74.9%, 75.5%, 78.6%.

Данные результаты являются неплохими сами по себе, т.к. набор данных не очень большой, но следует предпринять еще один шаг для улучшения данных результатов. Результат работы ансамбля трех «слабых учеников» приведен в Таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результат работы ансамбля

	1	2	3
1	0.80	0.16	0.04
2	0.14	0.82	0.04
3	0.07	0.1	0.83

Для ансамбля моделей точность на тестовом наборе данных составляет 81.7%, что больше точности каждой модели по-отдельности.

На приведенных таблицах присутствуют следующие обозначения:

1. 0.18 мм
2. 0.36 мм
3. 0.53 мм



### 3.4 Вывод по главе 3

Данная глава посвящена описанию и проведению вычислительного эксперимента по исследованию предлагаемого метода решения задачи вибродиагностики ответственных узлов и механизмов автотранспортного средства, а также анализу результатов этого эксперимента. Помимо этого, в данной главе описывается набор данных сигналов, собранный для проведения вычислительного эксперимента, и программный продукт, реализующий разработанный алгоритм решения задачи.

В результате проведения тестирования алгоритма в нормальных были выявлены конфигурации запуска, дающие наибольшую точность классификации. Были получены следующие значения точности локализации объектов на изображении:

- 74.9% на 1-ой модели
- 75.5% на 2-ой модели
- 78.6% на 3-ой модели
- 81.7% на ансамбле моделей

Приведенные результаты говорят о том, что предлагаемый алгоритм решения задачи обладает достаточно высокой точностью даже на относительно небольшом наборе данных для обучения.

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

## Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы был составлен обзор существующих известных методов решения задачи вибродиагностики ответственных узлов и механизмов автотранспортного средства. На основании этого обзора были сформулированы основные проблемы существующих методов, возникающие на различных этапах решения задачи.

С учётом информации, полученной в результате составления обзора был предложен новый метод решения задачи вибродиагностики ответственных узлов и механизмов автотранспортного средства. Данный метод заключается в использовании новой комбинации подходов к решению рассматриваемой задачи на различных этапах. На этапе формирования признакового описания объекта используются методы, основанные на теории активного восприятия.

Для реализации предложенного метода был разработан программный продукт на языке R. Разработанный алгоритм был протестирован на различных наборах входных данных в ходе проведенного вычислительного эксперимента. Полученные при проведении эксперимента результаты свидетельствуют о корректной работе предложенного метода при решении задачи.

Исходя из указанного выше можно сделать вывод о том, что поставленные перед началом научного исследования задачи были выполнены в полном объёме, а цель работы – достигнута.

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

## Список литературы

1. World Vehicle Population / WardsAuto. - URL: <https://www.wardsauto.com/news-analysis/world-vehicle-population-tops-1-billion-units>
2. Повреждения подшипников / Подшипник.ру УФА. — URL: <http://www.pkufa.ru/support/defects/> (дата обр. 2016).
3. 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.
4. 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.
5. Brotherton T., Pollard T., Jones D. Applications of time-frequency and timescale 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.
6. 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.
7. 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.
8. Marwala T., Vilakazi C. B. Computational intelligence for condition monitoring // arXiv preprint arXiv:0705.2604. — 2007.
9. Marwala T., Vilakazi C. B. Computational intelligence for condition monitoring // arXiv preprint arXiv:0705.2604. — 2007.

10. Wang J.-C., Wang J.-F., Weng Y.-S. Chip design of MFCC extraction for speech recognition // INTEGRATION, the VLSI journal. — 2002. — Т. 32, № 1. — С. 111—131.
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
13. Goodwin G. C., Payne R. L. Dynamic system identification: experiment design and data analysis.
14. Case Western Reserve University Bearing Data Center Website / CWRU. — URL: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/welcome-case-western-reserve-university-bearing-data-center-website> (дата обр. 2016).
15. Выявление дефектов подшипника качения с использованием системы признаков на основе теории активного восприятия / В. Гай [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2015. — Т. 13, № 3. — С. 31—36.
16. Hupkens T.M., de Clippeleir J. Noise and intensity invariant moments// Pattern Recognition, 1995. Vol. 16. P. 371- 376.
17. Wang L., Healey G. Using Zernike moments for the illumination and geometry invariant classification of multispectral texture// IEEE Trans. Image Process, 1998. Vol. 7. P. 196-203.
18. Flusser J., Suk T. Degraded image analysis: an invariant approach// IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.,1998. Vol. 20. P. 590-603.

19. Абрамов Н. С., Фраленко В. П. Определение расстояний на основе системы технического зрения и метода инвариантных моментов // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2012. — № 4. — С. 32-39

					ВКР-НГТУ-09.04.01-(М18-ИВТ-3)-012-2020(ПЗ)	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57