

ФГБОУ ВО ГРОЗНЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА
М.Д. МИЛЛИОНЩИКОВА

На правах рукописи



ВАХИДОВА Карина Лечиевна

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ И
ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ
ПОДШИПНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА
И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (технические науки)

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Минцаев М.Ш.

Грозный 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ	11
1.1 Классификация дефектов поверхностного слоя деталей подшипников	11
1.2 Методы обработки сигналов при вихретоковом контроле деталей	17
1.3 Постановка задач исследования	26
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАЧЕНИЯ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ ПРИ ВИХРЕТОВОМ КОНТРОЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА.....	28
2.1 Адаптивная фильтрация экспериментальных данных с использованием сингулярного спектрального анализа	28
2.2 Определение профиля поверхности при вихретоковом методе контроля	34
2.3 Обоснование применения теории распознавания образов с помощью фрактальной размерности информационных сигналов для определения локальных дефектов	42
2.3.1 Применение метода фрактальной размерности для контроля качества поверхностей	43
2.3.2 Фрактальный анализ профиля шлифованной поверхности	50
2.4 Архитектура нейронной сети для диагностики дефектов	52
2.5 Выводы.....	61
ГЛАВА 3. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ВИХРЕТОВЫХ ДАТЧИКОВ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ.....	62
3.1 Алгоритм формирования определения локальных дефектов.....	62
3.2 Адаптивная фильтрация экспериментальных данных, полученных при вихретоковом контроле, для основных локальных дефектов.....	64

3.3 Построение профиля поверхности локальных дефектов.....	69
3.4 Расчет фрактальной размерности локальных дефектов	73
3.5 Процедура обучения нейронной сети для диагностики дефектов	77
3.6 Выводы.....	82
ГЛАВА 4. ИНЖИНИРИНГ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ.....	83
4.1 Технические средства вихретокового контроля	83
4.2 Программные средства системы вихретокового контроля	88
4.3 Реализация алгоритма распознавания локальных дефектов с использованием современной SCADA-системы	91
4.4 Оценка эффективности системы вихретокового контроля	101
4.5 Выводы.....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	107
ПРИЛОЖЕНИЕ А Экспериментальные данные.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Листинги программ.....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ В Копии актов о внедрении результатов научной работы ..	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.....	142

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного производства надежность изготавливаемых изделий зависит от шлифовальной обработки сопровождающиеся процессами различного характера, например, тепловыми, колебательными и силовыми, что приводит к значительным отклонениям, как геометрических параметров, так и к изменению поверхностного слоя дорожек качения, в результате, появляются микротрещины, прижоги и другие проблемы, влияющие на прочность, долговечность и износостойчивость подшипников.

Для повышения качества выпускаемых изделий и увеличения производительности технологического процесса на предприятиях осуществляется применение нового оборудования, а также устройства управления. Происходит внедрение нового метода обработки, а также применение систем управления качеством производства.

Для повышения эффективности массового производства необходимо совершенствовать алгоритмическое и программное обеспечение контроля качества деталей подшипников. Использование современных технологии приводит к распознаванию основных дефектов поверхности детали, а также стоит отметить, что будет возможно вносить корректировку в технологический процесс и модернизировать используемое оборудование на предприятии.

Актуальность темы исследования. Вихретоковый контроль широко используется для определения свойств качества токопроводящих поверхностей, в том числе и для оценки качества поверхностей качения деталей подшипников. Повышение точности и достоверности контроля позволяет повысить эксплуатационные характеристики подшипников, увеличить срок их службы, снизить уровень шума и вибраций.

Существующие системы амплитудного, фазового и амплитудно-фазового допускового вихретокового контроля поверхностей качения деталей подшипников в связи с неоднозначностью связи контролируемых выходных сигналов вихретокового преобразователя с конструктивно-технологическими параметрами

шлифованной поверхности имеют высокий процент принятия ошибочных решений из-за возникновения ошибок контроля первого и второго рода.

Снижение процента ошибочных решений может достигаться применением современных интеллектуальных технологий контроля, в том числе с использованием фрактального анализа и нейронных сетей.

Степень разработанности темы исследования. Теоретическими исследованиями вихретокового метода занимались многие исследователи и ученые среди них Ключев В.В.[62], Сапожников А.Б. [106], Федосенко Ю. К.[115], а среди зарубежных ученых неоспоримый вклад по применению неразрушающего контроля (НК) внесли V. Dids, F. Ferster и ряд других. Эффективность исследования вихретокового метода и НК путем внедрения в производство рассматривались в работах Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина (СГТУ) Игнатьевым А.А.[46-52], Игнатьевым С.А.[53-57], Горбуновым В.В.[33]

Метод определения и обработки сигналов по фрактальной размерности рассматривался в различных областях науки Б. Мандельбротом [74], С. В. Божокиным, Д.А. Паршининым, А.А. Потаповым [84-85] и другими учеными.

Использование нейросетевых технологий в задачах контроля рассматривалось в работах ведущих ученых, таких как Д.А. Поспелов, И.М. Макаров, В.М. Лохин, К.А. Пупков, Н. Д. Егупов, А.И., Галушкин, F. Uossermen F., S. Naykin, K.M. Hangos, S. Omatu.

Однако в этих работах не рассматривались вопросы, связанные с совершенствованием вихретокового контроля и диагностики дефектов поверхностей деталей подшипников с использованием фрактального анализа и нейронных сетей, не исследовались вопросы повышения диагностирования бракованных изделий.

Целью диссертации является разработка и внедрение методов и технологий для автоматизации вихретокового контроля и диагностики дефектов поверхностей качения деталей подшипников с использованием фрактального

анализа и нейронных сетей, с целью повышения точности достоверности и надежности этих процессов.

В соответствии с поставленной целью в работе решается ряд задач:

- разработка и внедрение новых методов и технологий для автоматизации вихретокового контроля и диагностики дефектов поверхностей качения деталей подшипников, что позволит повысить качество продукции и улучшить ее долговечность;

- исследование и анализ влияния различных факторов, таких как конфигурация объекта, разрешение и диапазон измерений, скорость сканирования и температурный режим устройства, на точность и достоверность получаемых данных;

- регистрация и адаптивная фильтрация экспериментальных данных системы вихретокового контроля и формирование обучающих выборок для проведения фрактального анализа, и обучения нейронных сетей;

- создание 3D-поверхностей деталей качения подшипников по сигналам вихретокового датчика;

- разработка методического обеспечения для автоматического распознавания локальных дефектов колец на основе фрактального анализа полученных 3D -поверхностей и вычисление их фрактальной размерности;

- формирование, обучение и практическое применение нейронной сети для диагностики дефектов на основе полученных данных, что позволит улучшить точность и быстродействие системы контроля;

- разработка системы автоматизированного контроля и распознавание локальных дефектов поверхностей деталей подшипников;

- разработка и тестирование программного обеспечения для автоматизации процесса вихретокового контроля и диагностики дефектов, что позволит упростить процесс и сделать его более эффективным;

- практическая реализация разработанной методики.

Объектом исследования являются системы вихретокового контроля дефектов поверхностей деталей подшипников

Предмет исследования: модели, методы, алгоритмы и технические средства автоматизированного вихретокового контроля дефектов поверхностей деталей подшипников, выполненные на основе фрактального анализа и нейросетевых технологий.

Методы исследования. Исследования проводились на базе автоматизации технологических процессов контроля в машиностроении, сингулярного спектрального анализа, фрактального анализа, нейросетевых технологий, математического моделирования, численных и экспериментальных методов с использованием автоматизированной системы вихретокового контроля деталей подшипников ПВК-К2М.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует следующим пунктам специальности ВАК 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки):

- пункту 2 «Автоматизация контроля и испытаний»
- пункту 6 «Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами»;
- пункту 15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСТПП и др.».

Научная новизна результатов работы состоит в следующем:

1. Предложено осуществлять адаптивную фильтрацию экспериментальных данных с использованием сингулярного спектрального анализа, что позволило исключить влияние помех на достоверность контроля качества поверхностей деталей подшипников и сформировать валидированные обучающие выборки для проведения фрактального анализа и обучения нейронных сетей.

2. Разработан алгоритм формирования 3D-поверхностей деталей подшипников по сигналам вихретокового датчика, позволяющий оценить геометрию шлифованной поверхности и повысить достоверность вихретокового контроля.

3. Выполнен фрактальный анализ полученных 3D-поверхностей и определена фрактальная размерность поверхностей деталей подшипников с характерными дефектами, на основе которой осуществляется интегральная оценка качества поверхностей и достоверная диагностика дефектов.

Теоретическая значимость работы. В работе предложено и обосновано использование фрактального анализа для получения интегральной оценки качества поверхности подшипника для дальнейшего диагностирования дефектов.

Практическая значимость результатов исследования.

1. В результате устранения высокочастотных и низкочастотных помех за счет адаптивной фильтрации экспериментальных данных с использованием сингулярного спектрального анализа на 20 % повышена достоверность вихретокового контроля и уменьшено время контроля.

2. Повышена достоверность диагностики характерных поверхностных дефектов деталей подшипников с использованием интегральной оценки качества на основе определения фрактальных размерностей шлифованных поверхностей с последующей обработкой этих размерностей нейронной сетью.

3. Разработанная SCADA-система автоматизированного контроля и распознавания локальных дефектов поверхностей качения колец подшипников позволяет существенно повысить оперативность контроля и диагностики дефектов. Автоматическое обнаружение дефектов по сравнению с традиционным визуальным сокращает время их обнаружения.

На защиту выносятся следующие положения.

1. Алгоритм адаптивной фильтрации полученных информационных сигналов с вихретокового датчика, основанный на сингулярном спектральном анализе, устраняющий низкочастотные и высокочастотные помехи.

2. Алгоритм формирования 3D - поверхности деталей качения подшипников позволяющий по амплитудной и фазовой составляющим сигналов вихретокового датчика оценить шлифованную поверхность, повысив тем самым достоверность вихретокового контроля.

3. Результаты фрактального анализа полученных 3D -поверхностей и определение значений их фрактальной размерности, позволившие получить интегральную оценку качества шлифованных поверхностей и повысить достоверность последующей диагностики дефектов.

4. Архитектура и процедура обучения радиальной базисной сети, обеспечивающая высокую достоверность диагностирования дефектов.

5. SCADA - система автоматизированного контроля и диагностирования локальных дефектов поверхностей колец подшипников, повышающая оперативность их контроля и диагностики.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждена путем математических доказательств, сходимостью теоретических и экспериментальных исследований, а также практическим внедрением разработанных алгоритмов и систем в производство.

Внедрение результатов работы. Алгоритм формирования 3D-поверхностей деталей качения подшипников по сигналам с вихретокового датчика, алгоритм диагностирования дефектов и специализированный программный модуль, выполненный в SCADA-системе внедрены в АО «ЕПК Саратов» г. Саратов, позволили повысить достоверность вихретокового контроля, тем самым снизить выпуск бракованной продукции.

Внедрение осуществлено в учебный процесс на кафедре «Автоматизация технологических процессов и производств» ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова».

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на конференциях различного уровня:

– международные научно-практические конференции «Фундаментальные и прикладные исследования проблемы и результаты» (Грозный, 2017 г); IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (Санкт-Петербург, 2017); Автотранспортный комплекс 3.0 Актуальные проблемы и перспективы развития (Грозный, 2023 г)

– всероссийские научно-технические конференции «Компьютерные технологии и телекоммуникации – 2016» (Грозный 2016 г); «Современные технологии в атомной энергетике» (Балаково, 2017г); «Миллионщиков 2018» (Грозный, 2018г); «Перспективы развития топливно-энергетического комплекса и современное состояние нефтегазового инженерного образования в России» (Грозный, 2018г); «Миллионщиков 2019» (Грозный, 2019г).

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа, в том числе 2 работы в журнале, индексируемом SCOPUS, 5 работ в журналах, рекомендованных ВАК, 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка, включающего 151 наименований, и приложений. Текст изложен на 108 страницах, содержит 58 рисунков и 9 таблиц.

ГЛАВА 1. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ ПРИ ИХ ПРОИЗВОДСТВЕ

1.1. Классификация дефектов поверхностного слоя деталей подшипников

В настоящее время каждое предприятие стремится снизить себестоимость выпускаемой продукции, сохранив при этом качество её изготовления. Для достижения поставленных целей необходимо в режиме реального времени повысить качество и производительность обработки деталей в условиях многопрофильного производства на основе автоматизированной оценки технического состояния технологических процессов и станков по динамическим характеристикам.

В результате различных неблагоприятных воздействий во время работы подшипниковых деталей происходит преждевременный отказ подшипника из-за наличия скрытых дефектов, вызванных в результате различных нарушений технологических процессов во время производства. Производство подшипников требует высочайшей точности и надежности процесса: даже малейшее отклонение от оптимальной формы или желаемого качества поверхности может вызвать повреждение подшипника.

Распространенные дефекты на поверхности подшипникового ролика, такие как трещины, прижоги, натирсы и другие, вызывают повышенные вибрации и шум подшипников, ускоряют их износ и в дальнейшем могут привести к выходу из строя оборудования во время дальнейшей эксплуатации бракованных изделий. Таким образом, крайне важно проверять поверхность подшипника, а также подшипниковые ролики, чтобы предотвратить попадание дефектной продукции на рынок.

Различные типы подшипников производятся по своим специфичным технологическим цепочкам, однако, все они включают общие для всех операции [45]:

- литье заготовок (для крупногабаритных подшипников);
- токарная обработка;
- термообработка;
- шлифование;
- сборка подшипников.

Эксплуатационная надежность подшипников во многом зависит от различного рода дефектов на поверхностях качения, возникающих на каждом этапе производства. В настоящее время в результате исследования разработаны алгоритмы классификации дефектов. Признаки, используемые в качестве данных для классификации, оказывают непосредственное влияние на результаты распознавания.

При выполнении токарных работ осуществляется точение заготовки, которое может выполняться разными технологическими способами.

Процесс шлифования приводит к нарушению однородности структуры поверхности детали, обусловленных возникновением прижогов и микротрещин, что приводит к уменьшению срока службы подшипников и повышает их уровень вибрации и шума.

Для изучения и выявления влияния параметров процесса шлифования, таких как глубина шлифования, скорость подачи и линейная скорость круга, на качество поверхности дорожки качения была проведена серия экспериментов в различных исследованиях при различных параметрах шлифования на высоких скоростях. Исследование показало, что скорость круга и скорость подачи являются более важными факторами, влияющими на качество поверхности, чем глубина шлифования. Также выявлено, что параметры режима шлифования и сопутствующие им вибрации совместно влияют на качество поверхности при шлифовании [109].

Шлифовочные трещины характеризуются тонкими (представленные на рисунке 1.1) трещинами в виде сетки или петлеобразного рисунка. Расположение только на поверхности. Причиной образования является повышенный нагрев обрабатываемой поверхности в процессе шлифования с последующим быстрым

охлаждением.

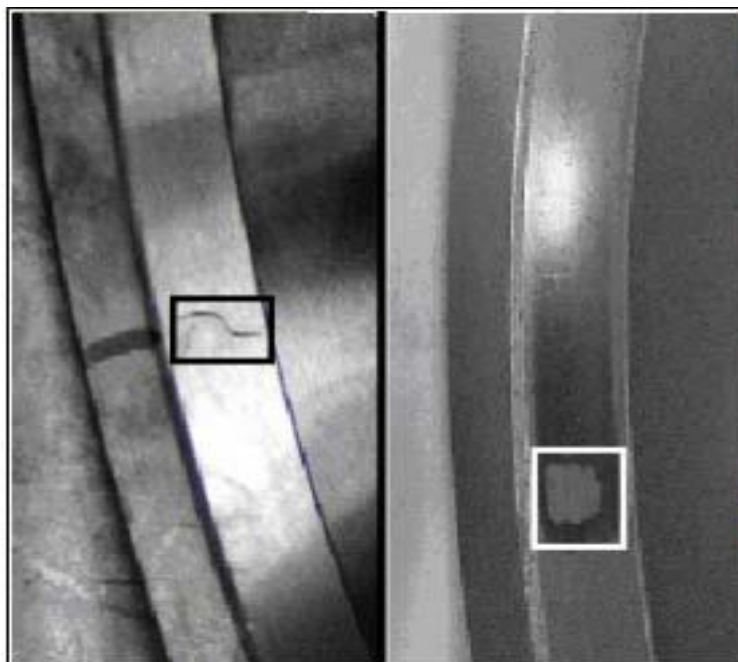


Рисунок 1.1 – Шлифовочные трещины

Закалочные трещины характеризуются более крупными прямолинейными трещинами; межкристаллические, обычно образуются вдоль зон охлаждения. Причина образования – высокие закалочные напряжения, превышающие прочность обрабатываемого материала.

Вибрации при шлифовке приводят к волнистости поверхности и потере точности заготовки. Увеличивается износ и ухудшается шероховатость заготовки. Для решения проблем, связанных с вибрацией, важным является определение источника и природы вибрации.

Прижоги различают по трем причинам возникновения:

- прижоговые пятна (рисунок 1.2), которые являются следствием вибрации шлифовального круга и биения шпинделя детали, неравномерной подачи, неправильной формы круга при изнашивании, неравномерном распределении припуска, засаливании круга, неисправности опор шпинделя;

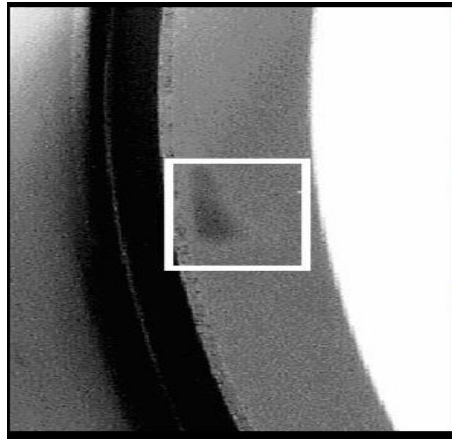


Рисунок 1.2 – Пятнистый прижог

- сплошной прижог, который является следствием чрезмерного длительного режима шлифования и завышенной твердости круга и сильного затупления режущих абразивных зёрен;

- штриховые прижоги (рисунок 1.3), которые являются следствием неоднородной структуры круга, неправильной установки детали, недостаточной очистки смазочно-охлаждающей жидкости.

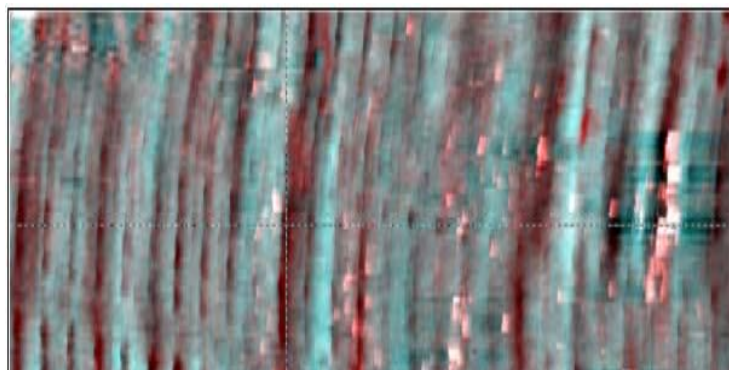


Рисунок 1.3 – Штриховой прижог

Для того чтобы снизить влияние воздействий в процессе шлифования, необходимо:

- периодически проверять подшипники шпинделя с помощью оборудования для анализа вибрации; это оборудование является отличным инструментом для прогнозирования возможных проблем с подшипниками шпинделя, которые могут привести к ухудшению качества колец подшипников;

- проверять крепление и точность базирования заготовки кольца при шлифовании, так как это также может привести к вибрации и, в конечном итоге, к ухудшению качества обработки поверхности;

- проверять систему правки круга: правильная правка круга имеет решающее значение для достижения хорошего качества поверхности, поэтому система правки должна быть в хорошем состоянии. Стационарные инструменты следует заменить, если они повреждены или изношены. Вращающиеся инструменты, такие как шлифовальный шпиндель, следует проверять на чрезмерную вибрацию, биение и перемещение;

- проводить регулярное техническое обслуживание станков. Крайне важно следовать инструкциям по эксплуатации по плановой смазке станков, контролю качества сжатого воздуха, частоте замены фильтров и т. д. Ступицы колес и оправки должны быть осмотрены на наличие повреждений, а также крепления и т.д. Осмотр оборудования должен быть частью ежедневного профилактического обслуживания на предприятии.

Натиры - своего рода износ, вызванный трением между подшипником и грубым предметом при его перемещении на производственной линии (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Натир

Рассматриваемые дефекты возникают в результате трения металлических поверхностей. Трение на концах цилиндрических роликов может происходить из-

за осевой нагрузки. Это наблюдается при обработке с продольной подачей круга, при которой возникает осевая составляющая силы резания.

Задиры на дорожках качения могут возникать в тех случаях, когда частота вращения относительно нагрузки из-за силы резания (например, при больших подачах круга) слишком высокая (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Задиры

Необходимо отметить, что именно при шлифовании в поверхностном слое (30...50 мкм) возникают наиболее распространенные дефекты типа прижогов, шлифовочных трещин, трооститных пятен и других (Приложение А), что определяет неоднородность структуры и твердости дорожек качения. Это обусловлено локальным повышением температуры в зоне контакта абразивного круга и детали. В связи с этим при обработке надо поддерживать заданные значения параметров режима шлифования так, чтобы минимизировать количество дефектов

Стоит отметить, что качество подшипников также связано с общей производительностью станка, влияя на его стабильную работу и косвенно влияя на качество выпускаемой продукции. Дефекты поверхности подшипников являются ключевым фактором в жизненном цикле подшипников. Классификация всех известных дефектов поверхности представлена в

Приложении А. Производители подшипников придают большое значение качеству своей продукции и, как правило, продукцию тщательно проверяют перед тем, как отгрузить заказчику. Возникает задача автоматизации обнаружения и сортировки деталей, распознавание дефектов поверхностного слоя колец и роликов подшипников. На предприятиях, таких как АО «ЕПК-Саратов» (ранее ОАО «Саратовский подшипниковый завод»), внедрены системы вихретокового контроля для распознавания дефектов и максимальная возможная степень автоматизации контроля качества поверхностного слоя деталей подшипников после операции, что позволяет целенаправленно воздействовать на причины возникновения выявляемых типов неоднородностей. Это приводит к снижению себестоимости контроля качества и охватывает больший объем выборки контролируемых изделий, что повышает эффективность всей системы контроля. Наиболее важным в этом случае является совершенствование алгоритмического и программного обеспечения автоматизированных средств контроля для повышения их быстродействия и достоверности распознавания дефектов.

1.2. Методы обработки сигналов при вихретоковом контроле деталей

Подшипник - один из важнейших компонентов в машиностроении. В основе жизненного цикла производства подшипников лежат оценка качества, мониторинг состояния и диагностика неисправностей. В настоящее время методы исследования мониторинга состояния и диагностики неисправностей постоянно совершенствуются.

Методы контроля шлифованных поверхностей колец подшипников:

- визуальный контроль качества обработанных поверхностей,
- контроль геометрических параметров точности (размеры, овальность, волнистость, шероховатость),
- автоматизированный контроль качества шлифованных поверхностей.

Вихретоковый метод широко применяется для контроля выпускаемых изделий и основан на законе электромагнитной индукции [62].

Основными преимуществами вихретокового метода являются высокая надежность распознавания поверхностных дефектов, высокая скорость контроля, возможность бесконтактного определения параметров, работоспособность в различных условиях, возможность быстрого и точного мониторинга, повторяемость результатов, возможность автоматизации и документирования. Развитие микропроцессорной технологии позволяет решать ранее недоступные задачи, в первую очередь из-за большого количества поступающей информации и сложности их математической обработки.

В вихретоковом методе анализируется электрический ток — либо вихревой, либо ток Фуко, который индуцируется в испытательном фрагменте, и изменения в этом токе измеряются. Изменения происходят из-за наличия разрывов. При вихретоковом исследовании измеряется удельное сопротивление, вызванное изменениями химического состава, ориентации кристаллов, термообработки, твердости или разрывов.

Предприятия разработали методы испытаний систем, которые используют катушки возбуждения и большие магнитоотражатели, также называемые GMR, с адекватными системами управления. Поля магнитной индукции вводятся в материал или сварной шов для испытания с помощью вихретоковых зондов. Системы управления часто используют синусоидальные генераторы сигналов как часть комплексной системы.

Процесс начинается с создания тока возбуждения усилителем трансмиссии, который приводится в действие генератором. Сигнал напряжения, получаемый от вихревого зонда через GMR, усиливается на настройке низкого уровня шума на некотором приемлемом значении усиления. Обнаруженный сигнал подается на аналоговый входной процессор на частоте около 1,2 МГц. Сигналы обрабатываются для получения вихретокового изображения дефекта с координатами x и y для анализа.

Другие системы улучшения изображений и системы обработки добавляются для улучшения читаемости дефектов.

На вихретоковое диагностирование влияют характерные изменения магнитной проницаемости в дуплексном шве. Это может привести к гораздо большим показаниям, чем изменения проводимости из-за недостатка, т.е. отношение сигнал/шум может быть слишком низким. Относительно высокая магнитная проницаемость дуплекса по сравнению с аустенитными сталями, создает высокий уровень шума, который затрудняет обнаружение дефектов. Методы, основанные на новых конструкциях зондов, могут иметь некоторый потенциал, но обычные методы не рекомендуются. Компьютеризированные системы измерения поля и электромагнитных массивов демонстрируют способность к дефектоскопии в сварных швах из ферритной стали. Они могут оказаться более эффективными в распознавании дефектов на поверхности кольца подшипника.

Метод вихретокового контроля используется в различных областях: для проверки сварных швов в магнитном и немагнитном материале и особенно полезен при анализе поверхностей деталей. При использовании метода вихретокового контроля можно обнаружить микроскопические трещины на поверхности материала или вблизи нее, поверхности нуждаются в минимальной подготовке, при этом могут быть исследованы физически сложные геометрии. Метод также полезен для измерения электропроводности и толщины покрытия.

В настоящее время существует много методов по распознаванию и обработке информационных сигналов: целочисленные меры (интегралы и производные целого порядка), гауссовская статистика, марковские процессы и т.п.[34]

Фурье – анализ.

В основе обработки сигналов лежит преобразование Фурье (ПФ). Теоретически любую функцию можно представить таким образом, т. е. в виде суммы (возможно, бесконечной) синусоидальной и косинусоидальной функций различных амплитуд и частот.

Преобразование Фурье является основным методом анализа Фурье и раскладывает исходные данные на их частотные компоненты, которые часто называют частотным спектром. Математически преобразование Фурье представляется как:

$$F(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\exp(-2\pi ikx)dx$$

где $F(k)$ — выходной спектр, который является функцией частоты, k , $f(x)$ — входные данные, которые являются функцией местоположения, x и i — мнимая единица измерения.

Преобразование Фурье имеет бесчисленное множество применений в спектральном анализе, решении дифференциальных уравнений.

Анализ Фурье также можно использовать для уменьшения высокочастотного и низкочастотного шума.

Быстрое преобразование Фурье (БПФ) делает преобразование Фурье применимым к реальным данным. БПФ рассматривает спектральный анализ и вычислительную физику. Тем не менее, можно сделать вывод, что БПФ оказало большое влияние на науку и технику, но его возможности извлечения информации из сигнала ограничены. В частности, преобразование Фурье раскрывает полную информацию о частоте. Во многих ситуациях важная информация сохраняется не на протяжении всего сигнала, а в течение короткого промежутка времени. Альтернативным аналитическим инструментом, который лучше подходит для таких задач, является вейвлет-преобразование[39].

Многоступенчатая фильтрация.

Цифровые фильтры представляют собой дискретно-временные системы. Типы цифровых фильтров, которые часто используются, являются линейными, поэтому они обладают всеми свойствами линейных дискретно-временных систем. Все линейные дискретно-временные операции на входной последовательности можно рассматривать как фильтрацию последовательности для получения выходной последовательности. Именно по этой причине

цифровые фильтры так важны; иными словами, их можно использовать в различных диапазонах частот.

Алгоритмы цифрового фильтра могут быть описаны системой разностных уравнений. Альтернативное представление использует графы потока сигналов, которые более четко иллюстрируют вычислительные свойства алгоритма, чем разностные уравнения. Это также является причиной того, что схемы используются для представления электрических сетей, а не систем дифференциально-интегральных уравнений.

Визуальный анализ.

Дефекты, возникающие на поверхности (любое несовершенство, повреждение или деформация на внешней поверхности) можно различить визуально.

Сборка подшипников во всем мире по большей части полностью автоматизирована. Однако проверка роликов подшипника и проверка поверхности подшипника до и после сборки по-прежнему в значительной степени основаны на ручном осмотре. Метод трудоемкий, неэффективный, дорогостоящий, и на него часто влияют такие факторы, как квалификация и опыт контроллера, визуальное разрешение невооруженного глаза и утомляемость, что обуславливает необходимость внедрения новых современных средств автоматизации[121].

Автокорреляционный анализ.

Автокорреляционный анализ может дать информацию о наличии значимого периодического компонента в наборе полученных данных. Процедура состоит из расчета коэффициента корреляции между временным рядом и копией самого себя при ошибках $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ и других интервалах выборки. В тех случаях, когда временной ряд имеет периодическую составляющую X мин, функция автокорреляции (определяемая как рассчитанные коэффициенты корреляции как функция ошибки) будет демонстрировать отрицательный коэффициент корреляции при ошибке приблизительно $X/2$ мин и положительный коэффициент корреляции при ошибке X мин. Значимость коэффициента

корреляции при ошибке X мин можно оценить с помощью Z -значений Фишера. Для этого конкретного типа анализа наличие трендов медленнее, чем периодическое пульсирующее поведение интереса, может исказить анализ, и необходимо устранение долгосрочных тенденций.

Поскольку они раскрывают различные типы информации, часто рекомендуется комбинированное использование автокорреляционного и импульсного анализов.

Другими словами, функция автокорреляции описывает, насколько хорошо сигнал коррелирует со смещенными версиями самого себя. Это может быть полезно для поиска сегментов сигнала, которые повторяются. Иначе говоря, автокорреляция показывает, как сигнал коррелирует с соседними частями самого себя. По мере увеличения сдвига сигнал сравнивается с более отдаленными соседними. Определение того, как соседние сегменты сигнала связаны друг с другом, дает некоторое представление о том, как сигнал был сгенерирован или изменен промежуточными процессами. Например, сигнал, который остается сильно коррелированным с самим собой в течение определенного периода времени, должен быть произведен или изменен каким-либо процессом, который учитывал предыдущие значения сигнала. Такой процесс можно описать как имеющий память, так как он должен запоминать прошлые значения сигнала и использовать эту информацию для формирования текущих значений сигнала. Чем длительнее память, тем дольше сигнал остается частично коррелированным со смещенными версиями самого себя. Так же, как память имеет тенденцию исчезать с течением времени, функция автокорреляции обычно сводится к нулю при достаточно больших временных сдвигах [116-117].

Дисперсионный анализ.

Дисперсионный анализ является концептуально простым, мощным и популярным способом проведения статистического анализа в экспериментах, в которых участвуют массивы данных. Он сравнивает средние значения двух выборок (или выборки и совокупности) относительно стандартной погрешности среднего или объединенного стандартного отклонения.

Дисперсионный анализ разделяет наблюдаемую совокупную изменчивость, которая находится внутри набора данных. Затем происходит разделение данных на независимые факторы и случайные факторы. В независимом факторе этот набор данных оказывает статистическое влияние.

С другой стороны, случайные факторы не имеют этой функции. Дисперсионный анализ используется для определения влияния, которое независимая переменная оказывает на зависимую переменную. С помощью дисперсионного анализа проверяются различия между двумя или более средними значениями.

В целом дисперсионный анализ следует трем основным предположениям:

1. Распределение зависимой переменной должно быть непрерывным и приблизительно нормальным

2. Независимость образцов

3. Однородность дисперсий

Затем происходит оценка отношений дисперсии между группами по сравнению с дисперсией внутри, чтобы рассчитать ее f -значение.

Вейвлет-преобразования.

Основным недостатком преобразования Фурье является то, что данный метод фиксирует полную информацию о частотах, то есть частоты, которые сохраняются для всего сигнала. Этот тип разложения сигнала может не подходить для всех задач, например, когда сигналы имеют короткие интервалы характерных колебаний. Альтернативным подходом является вейвлет-преобразование, которое разлагает функцию на набор вейвлетов.

Вейвлет-преобразование можно рассматривать как проекцию сигнала в набор базисных функций, называемых вейвлетами. Такие базисные функции предлагают локализацию в частотной области.

Вейвлет — это волнообразное колебание, локализованное во времени. Вейвлеты имеют два основных свойства: масштаб и местоположение. Масштаб (или расширение) определяет, насколько «растянут» или «сжат» вейвлет. Местоположение определяет положение вейвлета во времени (или

пространстве)[39].

Основная идея состоит в том, чтобы вычислить, какая часть вейвлета содержится в сигнале для определенного масштаба и местоположения. Для тех, кто знаком с извилинами, это именно то, что есть. Сигнал свернут с набором вейвлетов в различных масштабах. Другими словами, происходит выбор вейвлета определенного масштаба. Затем происходит перемещение вейвлета по всему сигналу, т.е. изменяется его местоположение, где на каждом временном шаге перемножаются вейвлет и сигнал. Произведение этого умножения дает коэффициент для этого масштаба вейвлета на этом временном шаге. Затем увеличивается масштаб вейвлета и повторяется процесс.

Существуют два типа вейвлет-преобразований: непрерывное и дискретное. Ключевое различие между этими двумя типами заключается в том, что непрерывное вейвлет-преобразование использует каждый возможный вейвлет в диапазоне масштабов и местоположений, т. е. бесконечное количество масштабов и местоположений, в то время как дискретное вейвлет-преобразование использует конечный набор вейвлетов, т.е. определенный в конкретном наборе масштабов и местоположений [48,94].

Выбор вейвлета, который используется для частотно-временной декомпозиции, является наиболее важным. Этим выбором мы можем влиять на временное и частотное разрешение результата. Мы не можем таким образом изменить основные характеристики ВТ (низкие частоты имеют хорошее частотное и плохое временное разрешение; высокие частоты имеют хорошее временное и плохое частотное разрешение), но мы можем каким-то образом увеличить общую частоту полного временного разрешения. Это прямо пропорционально ширине используемого вейвлета в реальном пространстве и пространстве Фурье.

К преимуществам вейвлет-преобразования можно отнести следующие:

- данное преобразование может одновременно извлекать локальную спектральную и временную информацию;
- разнообразие вейвлетов на выбор согласно решаемой задаче.

Недостатком является их относительная сложность.

Фрактальная геометрия. Фрактальное измерение - это мера того, насколько «сложна» самоподобная фигура. В грубом смысле оно измеряет «сколько точек» лежит в данном наборе. Вычисление фрактальной размерности точно самоподобных фигур довольно просто. Этот подход, который ограничен фракталами, структура которых может быть определена математически, дает точные значения [74].

Фрактальные сигналы — это сигналы, которые демонстрируют самоподобное поведение, а точки данных для фрактальных сигналов выглядят одинаково в разных временных масштабах. Методы анализа для изучения свойств фрактальных сигналов существуют как для обработки данных в режиме реального времени, так и для постобработки данных.

Фрактальным сигналам не нужно вечно повторять самоподобное свойство. В реальной жизни сигналы не идеальны. Даже если бы это было так, электронные датчики, которые существуют для записи данных, не идеальны, а погрешность измерения предотвращает повторение шаблона навсегда.

Функция фрактального анализа состоит в том, чтобы определить, какие характеристики фракталов существуют в сигнальных данных, и использовать эти свойства для сравнения сигнала из разных полей.

Фрактальная размерность в сочетании со статистическими инструментами представляет собой информативный инструмент для количественной оценки полученных данных, для отслеживания источника низкого качества, оптимизации производства и исследования источника нестабильности подсистем производственных процессов в промышленных системах. Для полного анализа данных используются только выбранные параметры, чтобы сократить время обработки.

Используя современные методы, фрактальный анализ может выполняться в режиме реального времени по мере сбора данных.

Метод определения фрактальной размерности информационных сигналов с вихретокового датчика является более точным и информативным.

Также можно распознать и классифицировать неоднородности возникающие на поверхности детали.

В рамках диссертационного исследования рассматривались различные методы обработки сигналов, полученных с прибора контроля, были проанализированы их достоинства и недостатки. В целом, можно сделать вывод, что для изменения текущей ситуации требуется метод, который может реализовать автоматическое онлайн-обнаружение в режиме реального времени. Разнообразие каждого вида дефекта и сложный фон изображений приводят к сложности создания шаблона.

1.3. Постановка задач исследования

Вихретоковый контроль с использованием фрактального анализа и нейронных сетей при обработке полученных информационных сигналов для выявления одиночных дефектов поверхностного слоя деталей подшипников дает преимущества в задачах классификации и распознавания, и открывает новые возможности для совершенствования системы контроля технологического процесса и повышения качества подшипников [10-12].

Таким образом, в соответствии с изложенным выше, научный и практический интерес представляет вопрос совершенствования алгоритмического и программного обеспечения для вихретоковых приборов, контролирующих детали подшипников. При этом важно обосновать выбор применяемого метода, что необходимо для повышения достоверности измерений.

В соответствии с поставленной целью осуществляются:

1. Регистрация и адаптивная фильтрация экспериментальных данных системы вихретокового контроля и формирование обучающих выборок для проведения фрактального анализа и обучения нейронных сетей.

2. Создание 3D -поверхностей деталей качения подшипников по сигналам вихретокового датчика.

3. Разработка методического обеспечения для автоматического распознавания локальных дефектов колец на основе фрактального анализа полученных 3D -поверхностей и вычисление их фрактальной размерности.
4. Формирование и обучение нейронной сети для диагностики дефектов.
5. Разработка системы автоматизированного контроля и распознавания локальных дефектов поверхностей качения колец подшипников.
6. Создание специализированного программного модуля для автоматизации поиска и распознавания основных дефектов.
7. Практическая реализации разработанной методики.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАЧЕНИЯ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ ПРИ ВИХРЕТОКОВОМ КОНТРОЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

2.1. Адаптивная фильтрация экспериментальных данных с использованием сингулярного спектрального анализа

Для устранения помех, возникающих в процессе контроля, предложено использовать адаптивную фильтрацию сигналов вихретокового датчика основанную на сингулярном спектральном анализе [2,30].

Анализ сингулярного спектра (SSA) — это относительно новый метод, первоначально разработанный в области климатологических исследований, но с тех пор успешно расширяется и применяется во множестве областей исследований, среди которых бионауки, геология, экономика и солнечная энергия. Инженерные науки также проявляют большой интерес к способностям SSA которые рассматриваются в данной работе.

Впервые SSA в области технических наук был рассмотрен в 1993 году, где был изучен ряд различных методов нелинейной диагностики, была проведена оценка на предмет их пригодности и эффективности для применения в крупногабаритном оборудовании.

Анализ сингулярного спектра (SSA) — это метод, основанный на разложении по сингулярным значениям (SVD), который позволяет эффективно раскладывать и восстанавливать сигналы. Сначала он преобразует одномерные данные в матрицу траектории с соответствующей длиной окна, и выбираются основные собственные значения для восстановления компонентов со значительной информацией о тенденциях.

Критерии использования SSA судили по их чувствительности к нелинейным явлениям, применимости в практике диагностики машин, их эффективность в компьютерном исполнении и их использованию на

предприятиях. Как известно, отказы механических систем всегда сопровождаются изменениями динамики от линейной или слабонелинейной к сильно нелинейной. Это потребовало применения нелинейных методов диагностики, которые реализуются по-разному и имеют разные достоинства и недостатки.

В результате исследования было установлено, что преимущество использования метода сингулярной фильтрации на компьютере было в относительной простоте, и некоторые типы ошибок можно было легко устранить.

Очень похожее исследование было проведено несколькими годами позже (2001), где нелинейные методы диагностики вращающегося оборудования оценивались с точки зрения диагностики. В этом исследовании внимание снова было уделено SSA и псевдофазовому портрету, а также к корреляционной функции.

Для вычисления трендовой и периодической составляющих рассмотрен метод сингулярного разложения временного ряда. Ф.И. Александров, Н.Э. Голяндина в работе[2] рассматривают задачу прогноза временных рядов с помощью метода «Гусеница»-SSA, а именно, исследуется многомерное обобщение метода для одновременного прогноза системы временных рядов.

Преимущества рассматриваемого метода представлен на рисунке 2.1:



Рисунок 2.1 – Преимущества метода «Гусеница»-SSA

Рассматриваемый метод «Гусеница»-SSA – сингулярное разложение траекторной матрицы, столбцами которой являются вектора вложения – отрезки ряда длины L , основного параметра метода, называемого длиной окна. Анализ членов сингулярного разложения позволяет сначала классифицировать их как относящиеся к одной из компонент ряда, а затем выделить эту компоненту.

Данный метод расширяется на случай, когда продолжаемый ряд лишь аппроксимируется рядом, управляемым ЛРФ. Ряды, управляемые ЛРФ, тесно связаны с рядами конечного ранга, то есть рядами, сингулярное разложение которых при достаточно большой длине ряда N и окна L имеет фиксированное число ненулевых компонент. Это означает, что вектора, составленные из L -мерных отрезков временных рядов, лежат в некотором подпространстве L -мерного евклидова пространства. При некоторых не очень существенных условиях размерность этого подпространства совпадает с размерностью минимальной ЛРФ, управляющей рядом, и базис подпространства определяет коэффициенты управляющей линейной рекуррентной формулы (не обязательно

минимальной размерности).

Рассматриваемый алгоритм «Гусеница»-SSA представлен на рисунке 2.2

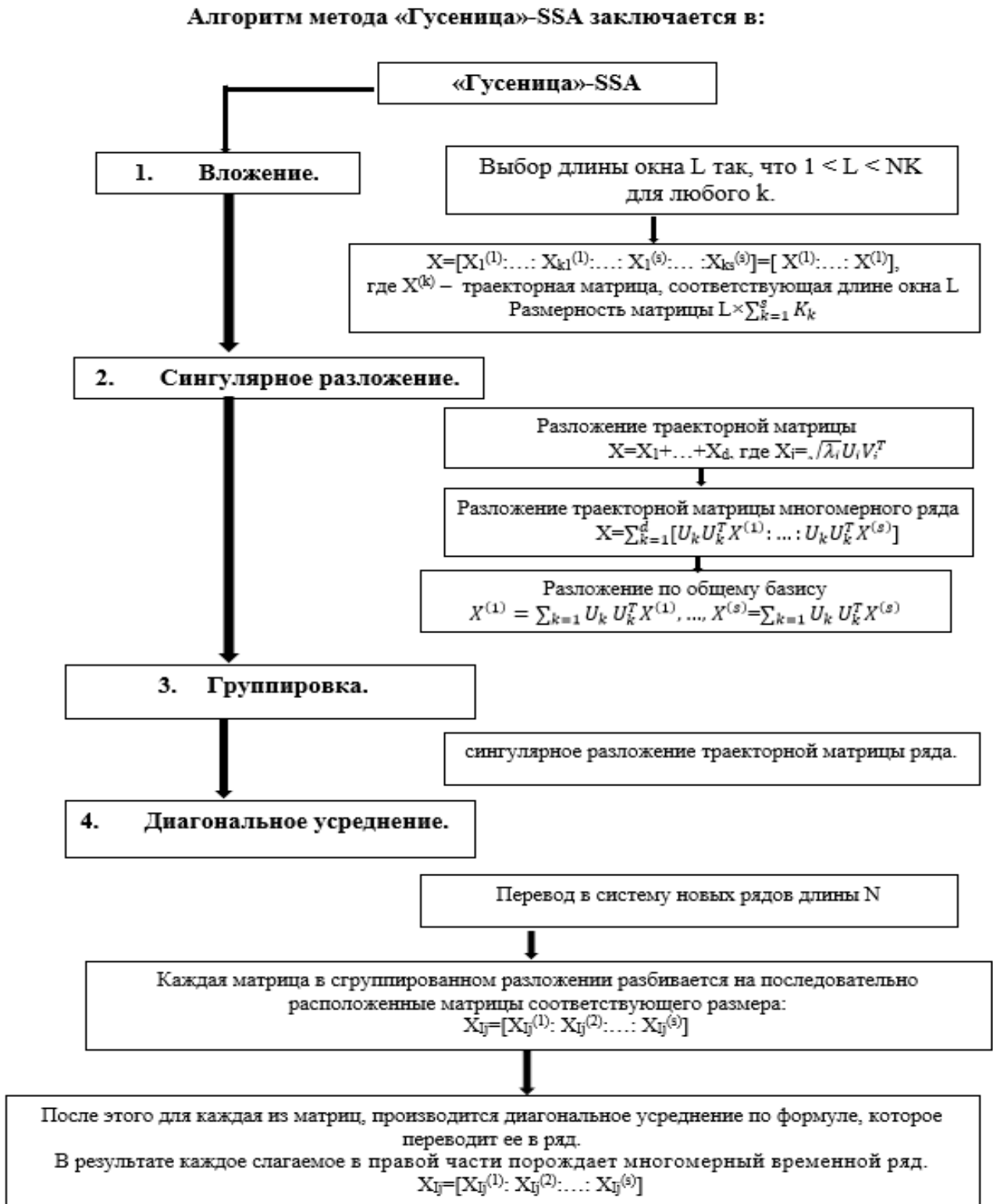
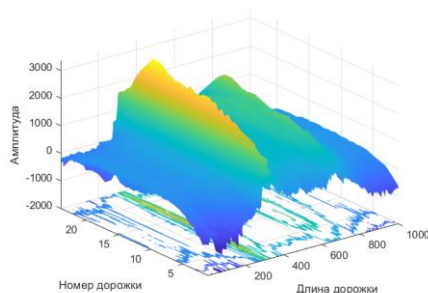


Рисунок 2.2 – Алгоритм метода «Гусеница»-SSA

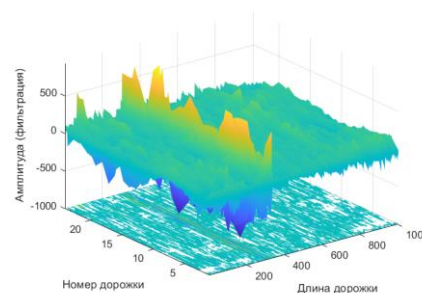
Таким образом, метод «Гусеница»-SSA определяет (приближенную)

управляющую ЛРФ, тем самым находя продолжающую ряд формулу. В случае рядов конечного ряда можно сказать, что мы продолжаем ряд, строя последовательность векторов, лежащую в заданном подпространстве.

На рисунке 2.3 показано удаление трендовой и регулярной составляющих из траекторной матрицы, сформированной по сигналам вихретокового датчика.

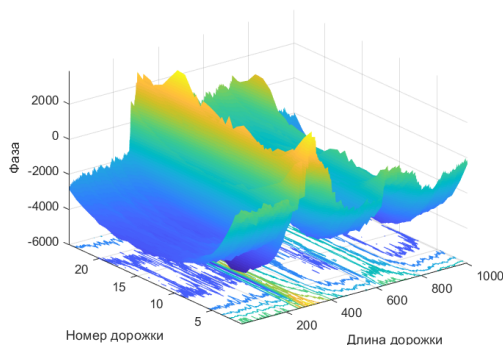


Исходная матрица
изменения амплитуды
сигнала

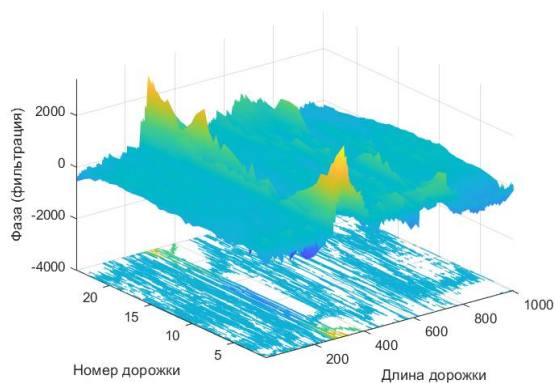


Матрица
изменения амплитуды
отфильтрованного сигнала

а)



Исходная матрица
изменения фазы сигнала



Матрица
изменения фазы
отфильтрованного сигнала

б)

Рисунок 2.3 – Фильтрация трендовой и регулярной составляющих из траекторной матрицы

Используя программу main (Приложении Б) произвели фильтрацию сигналов тока и фазы для выбранного дефекта «ментальная трещина» и визуализировали сигналы до и после

Таблица 2.1 – Отфильтрованные сигналы тока

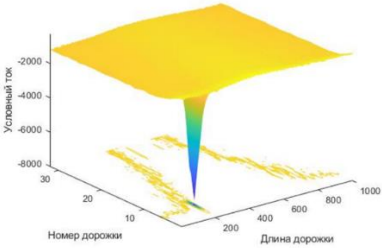
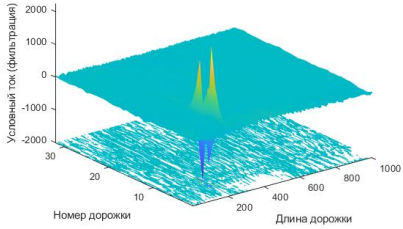
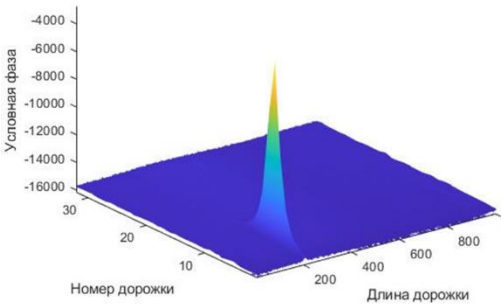
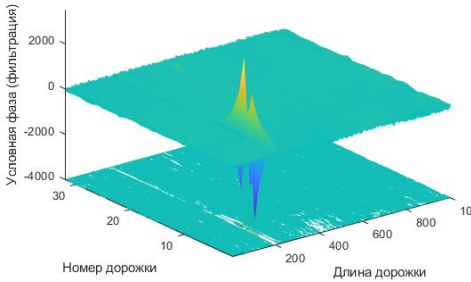
	Название дефекта	Ток	
		До фильтрации	После фильтрации
	Ментальная трещина		

Таблица 2.2 – Отфильтрованные сигналы фазы

	Название дефекта	Фаза	
		До фильтрации	После фильтрации
	Ментальная трещина		

Применение данного метода позволило исключить влияние помех на достоверность контроля, и сформировать валидированные обучающие выборки

для дальнейшего проведения фрактального анализа и обучения нейронных сетей.

2.2. Определение профиля поверхности при вихретоковом методе контроля

В процессе вихретокового контроля датчиком осуществляется сканирование контролируемой поверхности. Неравномерности и дефекты сканируемой поверхности приводят к изменению выходных сигналов датчика (тока, протекающего через обмотку датчика, и сдвига фазы между напряжением питания и током). После обработки сигналов тока и фазы делается заключение о результатах контроля/

Доказано, что трехэлементные схемы замещения датчиков обладают существенно меньшей погрешностью чем двухэлементные схемы замещения [1], а из трёхэлементных схем замещения предпочтение следует отдавать схеме, приведенной на рисунке 2.4.

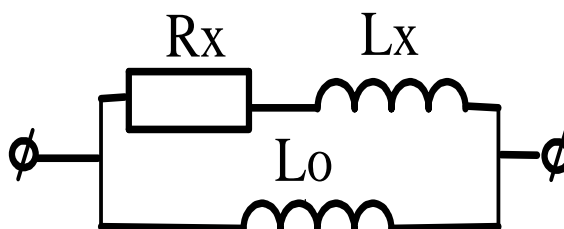


Рисунок 2.4 – Трёхэлементная схема замещения вихретокового датчика

На рисунке индуктивность L_x и сопротивление R_x – это вносимые параметры схемы замещения, обусловленные взаимодействием магнитного поля датчика со сканируемой токопроводящей поверхностью, L_0 – индуктивность катушки датчика.

Приведённая схема замещения на рисунке 2.4 показала следующие результаты.

Таблица 2.3 – Параметры трехэлементной схемы замещения вихретокового датчика

Расстояние/ Параметр	R_z	L_x	L_0
Единица измерения			
Мм	Ом	мкГн	мкГн
0,1	320	24,2	25,6
0,8	282	24,2	22,6
1,5	245	24,3	19,4
2,2	223	24,2	17,6
2,8	212	24,4	16,8

По данным таблицы 2.3 была проведена аппроксимация зависимости индуктивного (на частоте 10 мГц) и активного сопротивления датчика от зазора уравнениями экспоненты

$$R_x = R_n e^{-rs} + R_d; \quad (2.1)$$

$$xL_x = xL_n e^{-ls} + xL_d, \quad (2.2)$$

где $R_n = 153,7$ Ом;

$R_d = 178$ Ом;

$r = 0,5456$ 1/мм;

$xL_n = 121,1$ Ом;

$xL_d = 150$ Ом;

$l = 0,6831$ 1/мм.

На рисунке 2.5 показаны результаты аппроксимации.

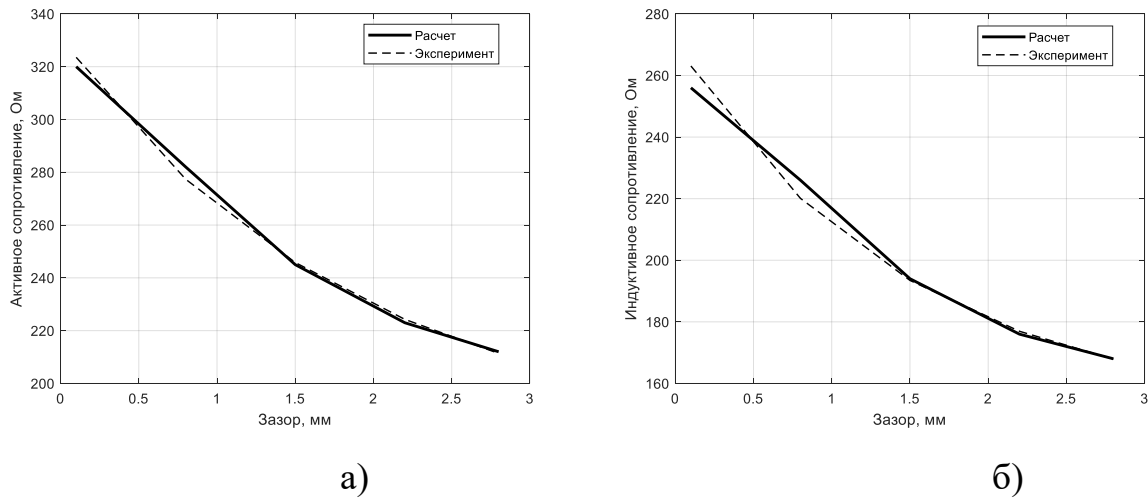


Рисунок 2.5 – Зависимость активного и индуктивного сопротивления вихретокового датчика от зазора

Проведём калибровку вибродатчика при сканировании им шлифованной поверхности с $Ra=0,5$ (программа kkoг.m представлена в приложении Б). Примем $Ra=0,5\text{мкм}$, что в среднем соответствует шероховатости колец подшипников сгенерируем случайную величину, в которой $Ra=0,5$ среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины.

На рисунке 2.6 представлен фрагмент реализации случайной величины.

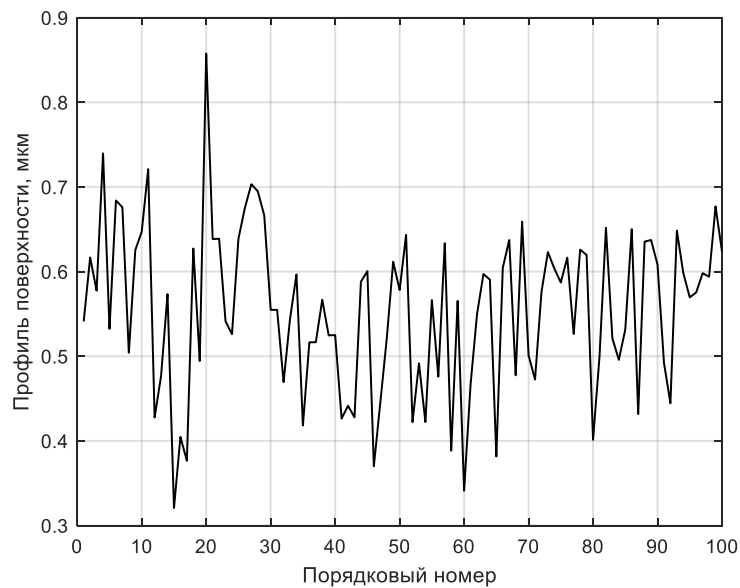


Рисунок 2.6 – Фрагмент смоделированного профиля поверхности дорожки подшипника

Для схемы замещения датчика (рисунок 2.3) передаточная функция, АЧХ и ФЧХ запишутся в следующем виде:

$$W(p) = \frac{(L_0 + L_x)p + R_x}{L_0 p(L_x p + R_x)}, \quad (2.3)$$

$$A(\omega) = \frac{1}{\omega L_0} \sqrt{\frac{R_x^2 + (L_0 + L_x)^2 \omega^2}{R_x^2 + L_x^2 \omega^2}}, \quad (2.4)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{R_x^2 + \omega(L_0 + L_x)L_x}{\omega L_0 R_x}\right). \quad (2.5)$$

Для определения неизвестных параметров L_x и R_x схемы замещения по измеренным значениям тока и сдвига фаз рассмотрим векторную диаграмму токов датчика [11,107,108].

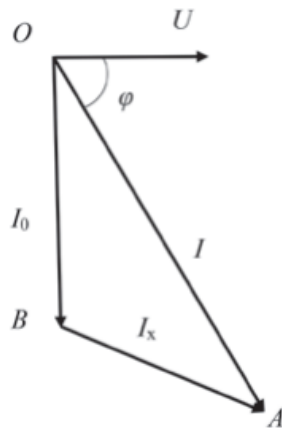


Рисунок 2.7 – Векторная диаграмма токов датчиков

Векторная диаграмма токов датчиков содержит следующие параметры:

U – напряжение питания,

I – регистрируемый ток датчика,

I_0 – регистрируемый ток, протекающий через индуктивность

L_0 (ток холостого хода),

I_x – ток, протекающий через вносимые параметры L_x и R_x ,

φ - регистрируемый фазовый сдвиг между напряжением и током датчика.

На рисунке 2.6 треугольник OAB определен по двум сторонам OA, OB и углу $90^\circ - \varphi$ между ними. Тогда по теореме косинусов I_x , а по теореме синусов $\sin \psi$:

$$\begin{aligned} I_x &= \sqrt{I^2 + I_0^2 - 2II_0 \cos \varphi(\Omega)} \\ \sin \psi &= \frac{I}{I_x} \sin(90^\circ - \varphi(\Omega)). \end{aligned} \quad (2.6)$$

Выражения для АЧХ и ФЧХ позволяют, на заданной рабочей частоте Ω , по измеренным значениям $A(\Omega)$ и $\varphi(\Omega)$ вычислить неизвестные индуктивность L_x и активное сопротивление R_x .

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{1}{I_x} \cos(\psi - 90^\circ); \\ L_x &= \frac{1}{I_x} \sin(\psi - 90^\circ), \end{aligned} \quad (2.7)$$

где $I = A(\Omega)$, $I_0 = \frac{1}{\Omega L_0}$ – ток холостого хода.

Проведённая аппроксимация зависимости индуктивного xL_x (на частоте 10 мГц) и активного сопротивления R_x датчика от зазора уравнениями экспоненты с максимальной абсолютной ошибкой аппроксимации, не превышающей 5 Ом, позволили вычислить искомый средний зазор между поверхностью датчика и сканируемой поверхностью.

По известному профилю поверхности (рисунок 2.8) с помощью аппроксимирующих формул вычисляются активное и индуктивное сопротивления датчика, а затем по найденным сопротивлениям с помощью выражений для АЧХ ((2.4) и ФЧХ (2.5) вычисляются амплитуда и фаза сигналов вихретокового датчика (рисунок 2.9 и 2.10).

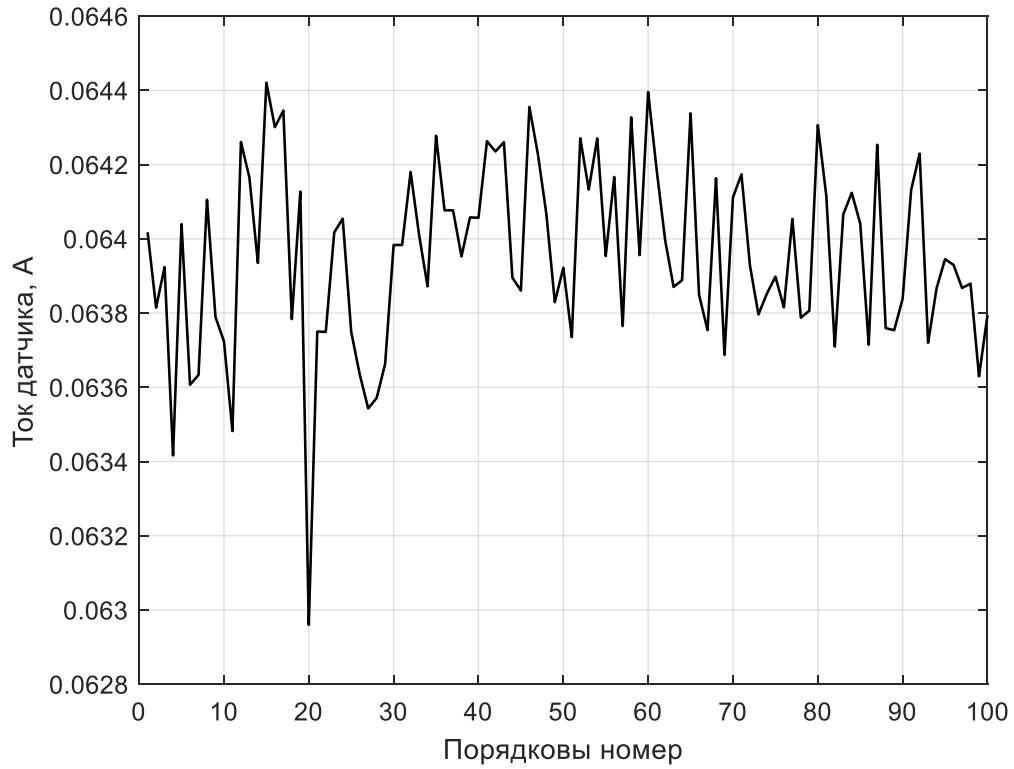


Рисунок 2.8 – Ток датчика при сканировании поверхности

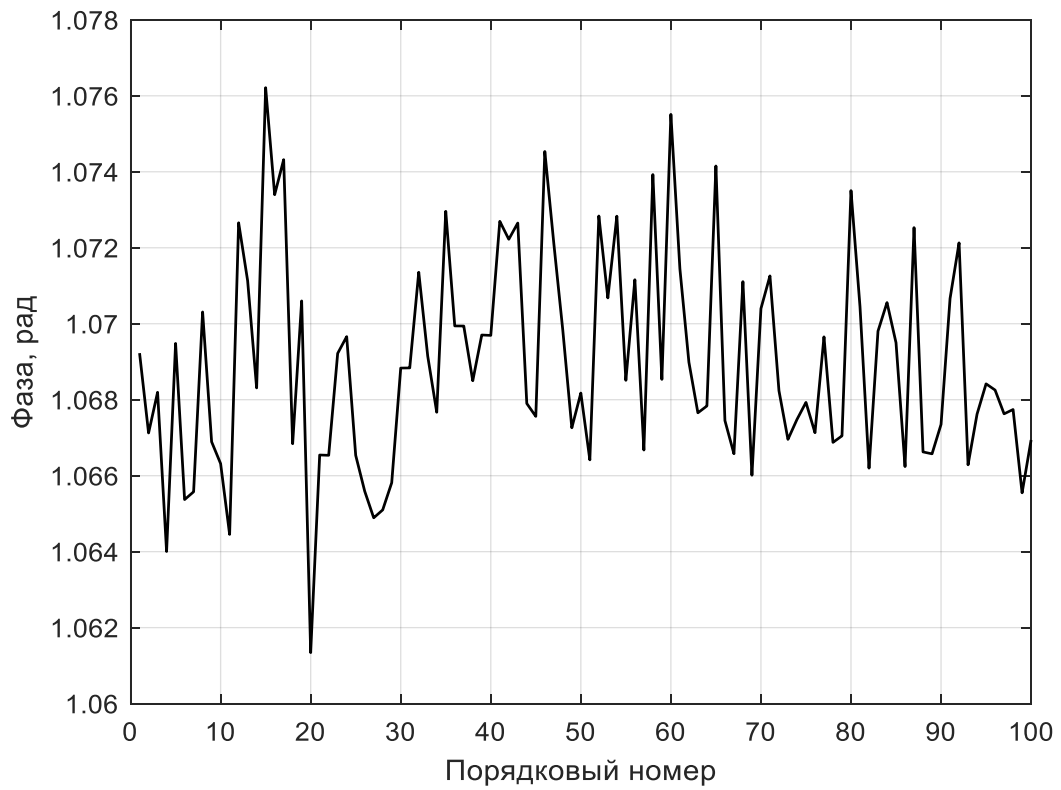


Рисунок 2.9 – Фаза датчика при сканировании поверхности

После проведения вычислительного эксперимента было осуществлено приведение сигналов реального датчика, сканирующего шлифованные поверхности подшипников, и виртуального датчика, характеристики которого получены в результате вычислительного эксперимента.

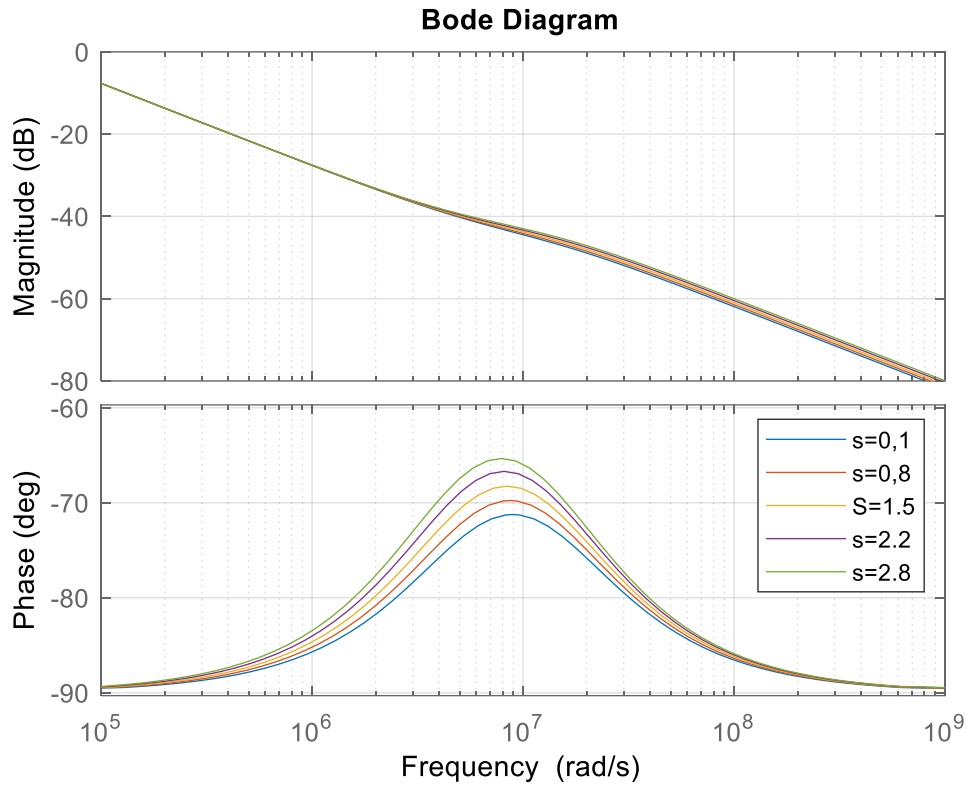


Рисунок 2.10 – ЛАЧХ и ФЧХ датчика при разных зазорах

Полученные графики позволяют по заданному зазору получить значения параметров схемы замещения и по формулам (2.3), (2.4) рассчитать АЧХ и ФЧХ (программа af.m представлена в приложении Б).

На практике требуется решить обратную задачу: по известным в процессе сканирования подшипника значениям АЧХ и ФЧХ определить сначала вносимые индуктивное и активное сопротивления датчика, а затем по аппроксимирующим кривым определить значение зазора.

Для решения этой задачи воспользуемся выражениями для АЧХ (2.3) и ФЧХ (2.4). После преобразований рассмотрим систему уравнения для вычисления индуктивного $Z_x = \omega L_x$ и активного R_x сопротивлений датчика при его работе на частоте 1 МГц.

$$\begin{cases} Z_x^2 + R_x^2 + \frac{2C}{Z_0} Z_x - C = 0; \\ Z_x^2 + R_x^2 + Z_0 Z_x + B R_x = 0, \end{cases} \quad (2.8)$$

где $Z_0 = \omega L_0$; $C = \frac{Z_0^2}{1-A^2}$; $A = A(\omega)Z_0$; $B = \tan[\varphi(\omega)Z_0]$;

$A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ - значения АЧХ и ФЧХ зарегистрированные на выходе датчика [11].

Программа решения прямой (расчет (тока и фазы) и обратной задач расчета (Z_x и R_x)) с именем **paszrx.m** приведена в Приложении Б.

Решения прямой и обратной задач совпадают.

Приведённые сигналы (ток и фаза) реального датчика через параметры виртуального датчика были пересчитаны в профиль шлифованной поверхности программой **main.m**, приведённой в Приложении Б.

Результаты расчетов показаны на рисунке 2.11, программа расчета приведена в Приложении Б.

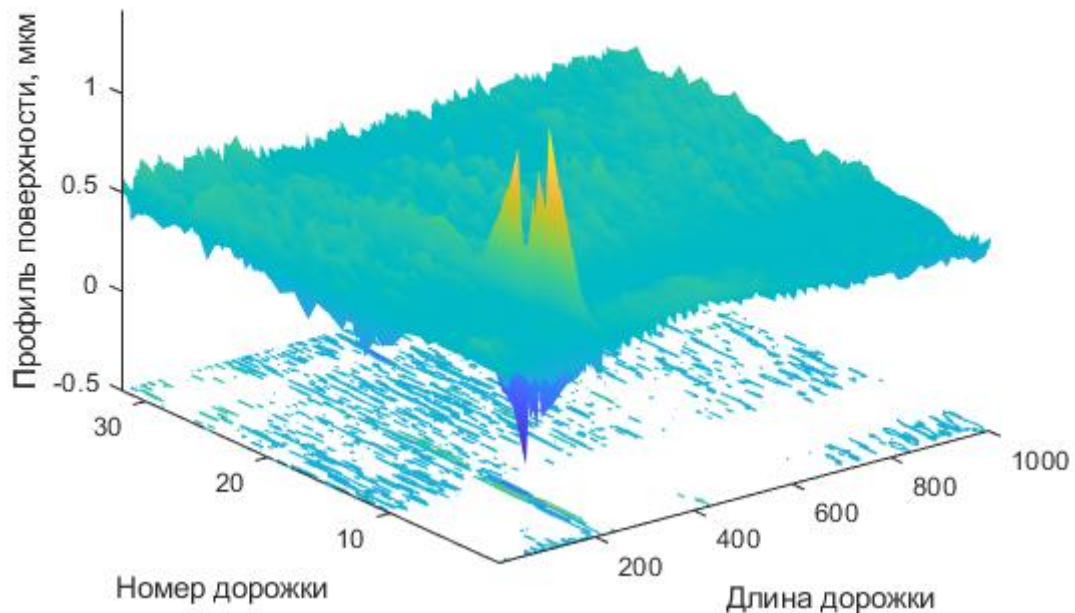


Рисунок 2.11 – Профиль поверхности

Предложено использовать 3х элементную схему замещения ВД, что позволило разработать алгоритм обработки сигналов тока и фазы ВД и определить параметры схемы замещения, с последующей оценкой шероховатости поверхности [80]

2.3. Обоснование применения теории распознавания образов с помощью фрактальной размерности информационных сигналов для определения локальных дефектов

В результате анализа научно-технической литературы были сделаны выводы о том, что вейвлет-преобразование представляет собой обычное разложение произвольной функции по некоторому базису, тогда как фрактальный анализ носит глобальный характер, который даст больше возможности при его использовании в современном производстве подшипников.

Сигналы, полученные от вибрации механического оборудования, всегда нелинейны. Теория фракталов - эффективное средство решения этой проблемы. Как важный параметр в теории фракталов, фрактальная размерность широко используется, включая возможность количественного измерения фрактальных характеристик нелинейных систем и измерения емкости, заполняющей пространство для сигналов. При диагностике механических неисправностей влияние нелинейных факторов на сигналы механической вибрации различно при различных состояниях неисправности.

Применение фрактальной геометрии на практике началось еще в 70-х гг. XX в. известным ученым Б. Мандельбротом, который внес значительный вклад в развитие современной науки.

2.3.1 Применение метода фрактальной размерности для контроля качества поверхностей

Параметр Херста является безразмерным фактором, используемым для оценки наличия и величины свойства самоподобия[71]. Это мера не только самоподобия, но и статистических свойств, которые влечет за собой самоподобие. В ходе проведенных научных исследований в данной работе рассмотрен Метод Херста, позволяющий выявить в статистических данных пакетного трафика следующие его свойства, представленные на рисунке 2.12:

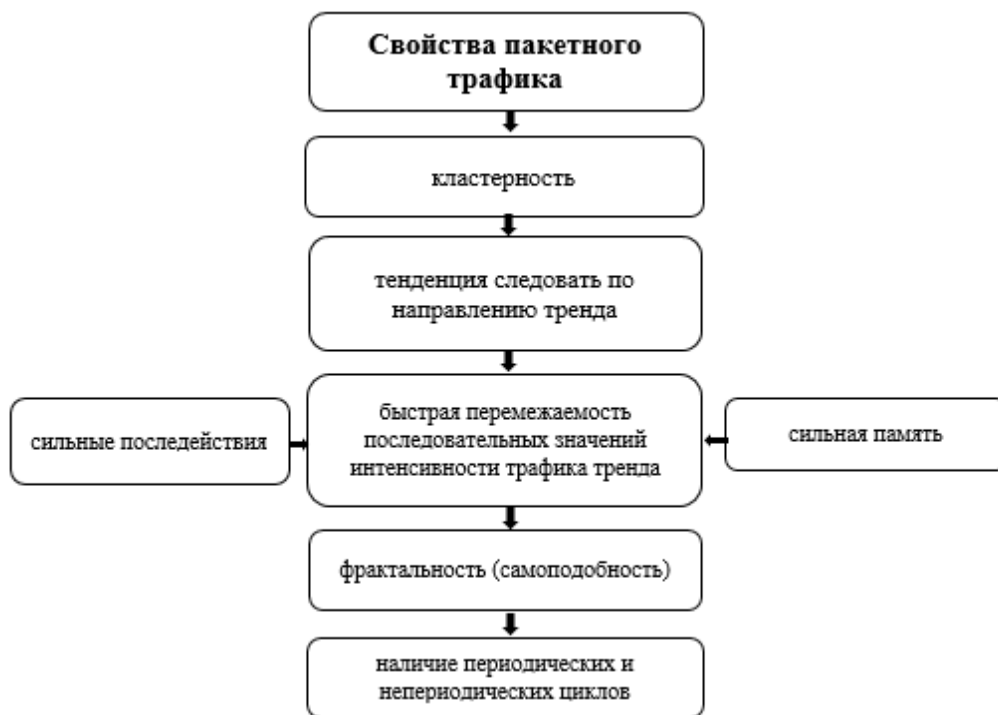


Рисунок 2.12 – Свойства пакетного трафика

Оценки параметра Херста полезны для понимания структуры автокорреляции и изменения процесса и, таким образом, для достижения вышеупомянутых целей, на которых основано изучение самоподобия. Параметр Херста соответствует фрактальной размерности d по соотношению $d=2-H$, где $1 < d < 2$ так, что H принимает значения больше 0 и меньше 1.

Показатель Херста H измеряет долговременную память временного ряда, характеризуя его либо как возврат к среднему, либо как тренд, либо как случайное. H представляет собой число от 0 до 1, где $H < 0,5$ указывает на возврат к среднему, $H > 0,5$ указывает на трендовый временной ряд, а $H = 0,5$ указывает на случайное блуждание. Меньшие и большие значения H указывают на более сильный возврат к среднему и тенденцию соответственно.

Однако, существующие методы расчета коэффициента Херста являются достаточно трудоемкими, что затрудняет их использование в условиях реального процессорного времени обработки параметров трафика при выявлении его самоподобных свойств.

Расчет коэффициента самоподобия Херста реального трафика обычно выполняется методом абсолютных моментов. В качестве значений случайного процесса рассматривается количество пакетов, поступающих в систему за единицу времени. Исходная последовательность (ряд) количества пакетов длиной N делится на периоды длиной m (отдельные агрегированные процессы размером m). На непересекающихся временных интервалах или на границах каждого периода k -я последовательность имеет среднее значение:

$$X_k^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m X_{(k-1)m+j}, \quad k = 1, 2, 3 \dots, [N/m].$$

где $k=1,2,3,\dots,(N/m)$.

После расчета среднего значения \bar{X} для всей последовательности, потом для каждого периода k рассчитывается дисперсия D_k :

$$D_k^{(m)} = \frac{1}{N/m} \sum_{j=1}^m (X_k^{(m)} - \bar{X})^2.$$

Для самоподобного процесса дисперсия агрегированных процессов должна убывать медленнее, чем величина, обратная размеру выборки m . Для выявления этого свойства строится дисперсионно-временной график зависимости дисперсий агрегированных процессов от степени агрегирования m . Поскольку Херстом было показано, что:

$$\log\left(\frac{\max D - \min D}{D_k^{(m)}}\right) \approx H \log\left(\frac{N}{2}\right),$$

то график этой зависимости строится тоже в логарифмическом масштабе.

Данная аппроксимация выполняется методом минимального среднеквадратичного отклонения от экспериментальных данных. Коэффициент β ($0 < \beta < 1$), задающий асимптотические свойства характеристик самоподобного случайного процесса, связан с параметром Херста следующим соотношением:

$$H = 1 - \frac{\beta}{2}.$$

Расчет коэффициента Херста H происходит методом наименьших квадратов.

На рисунке 2.13 представлен алгоритм расчета вспомогательных рядов, который включает в себя два этапа:

1. Подготовка ряда для расчета;
2. Расчет самих вспомогательных рядов.

Алгоритм расчета вспомогательных рядов

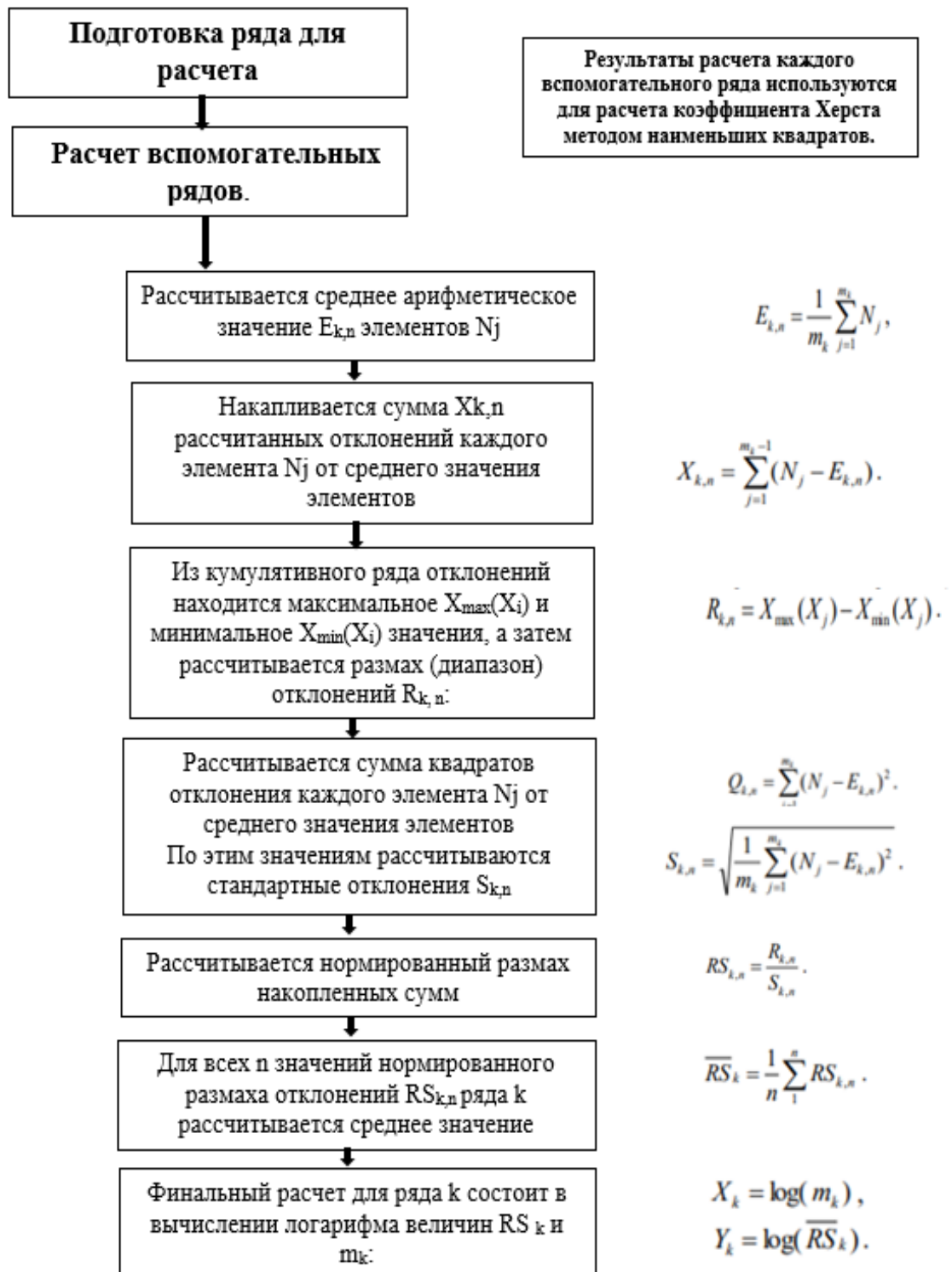


Рисунок 2.13 – Алгоритм расчета

Логарифм может быть выбран по любому основанию, но для примера с $N = 2^i$ именно при двоичном логарифме оказывается более удобным для расчета вид графика этой зависимости, показанного на рисунке 2.14.

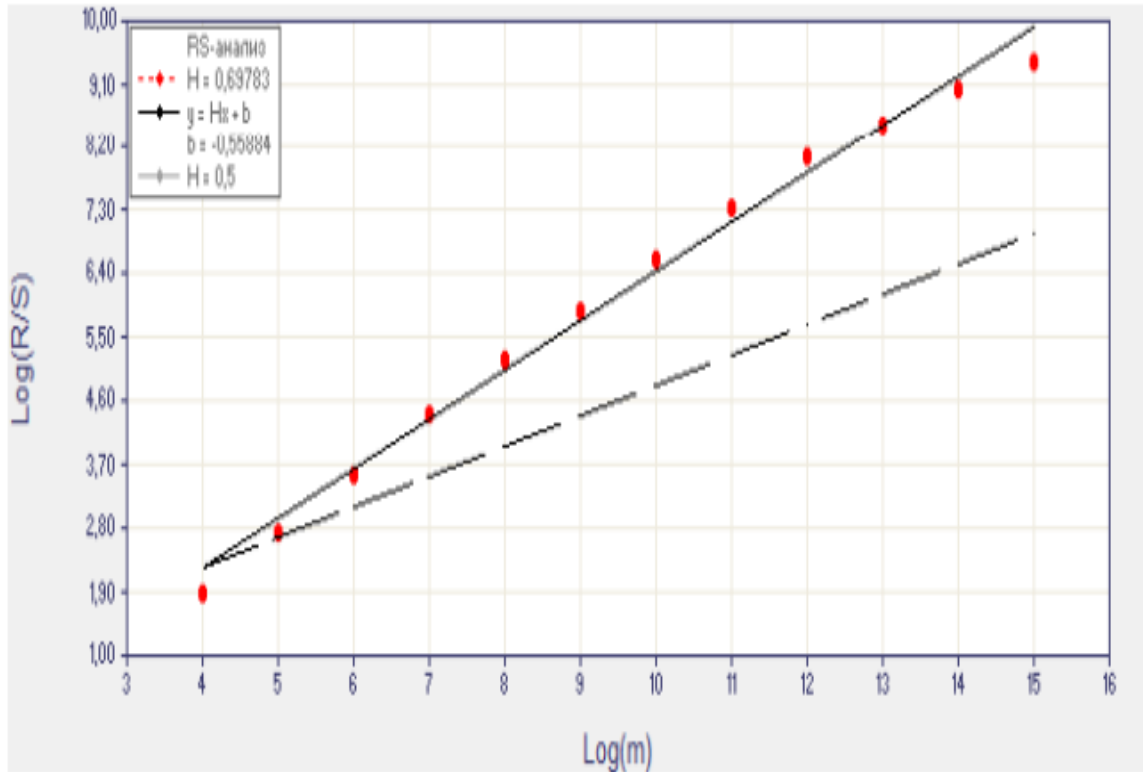


Рисунок 2.14 – График зависимости $\log(RS_k)$ от $\log(m_k)$

Удобство графика состоит в том, что по значениям оси абсцисс легко определяется длина периода m_k в соответствующей точке графика. На рисунке 2.12 сплошной линией показана прямая, сглаживающая данные расчета X_k и Y_k , а штриховой – наклон прямой, соответствующей $H = 0,5$.

Расчет коэффициента Херста.

Для оценки коэффициента Херста анализируется зависимость нормированного размаха R/S от длины периода m . Для этого методом линейной регрессии рассчитанные значения Y_k и X_k (данные каждого вспомогательного ряда) аппроксимируются функцией вида $y = ax + b$.

Рассчитанные значения Y_k и X_k определяют координаты точек графика зависимости $\log(RS_k)$ от $\log(m_k)$, показанного на рисунке 2.12. Коэффициент Херста H соответствует угловому коэффициенту a для прямой, проходящей максимально близко к этим точкам или через них.

Таким образом, по результатам R/S-анализа, определяемым значениями Y_k и X_k , рассчитывается коэффициент Херста H , равный значению углового коэффициента a для прямой, сглаживающей результаты расчета Y_k и X_k .

Коэффициент a всегда равен отношению величин относительного смещения двух произвольных точек этой прямой по осям x и y :

$$a = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

т.е. он равен производной уравнения прямой по x . Из рисунка 2.14 видно, что крайние точки графика несколько отдалены от аппроксимирующей прямой, полученной в результате регрессии данных Y_k и X_k . Следовательно, из этих данных для расчета углового коэффициента a или коэффициента Херста H необходимо использовать координаты других точек. Результат упрощенного расчета коэффициента H будет приближаться к результату расчета:

$$H = \frac{Y_{k-2} - Y_3}{X_{k-2} - X_3} \quad (2.9)$$

На рисунке 2.13 показан пример упрощенного расчета коэффициента Херста по значениям Y_k и X_k для третьего и десятого вспомогательных рядов из двенадцати (для третьей и десятой точки графика из двенадцати). Точность этого расчета достаточно высока, поскольку полный расчет по формулам (11) и (12) дает значение $H = 0,69783$, а по формуле (2.9) коэффициент $H = 0,70986$, что только на 1,72% превышает результат полного расчета.

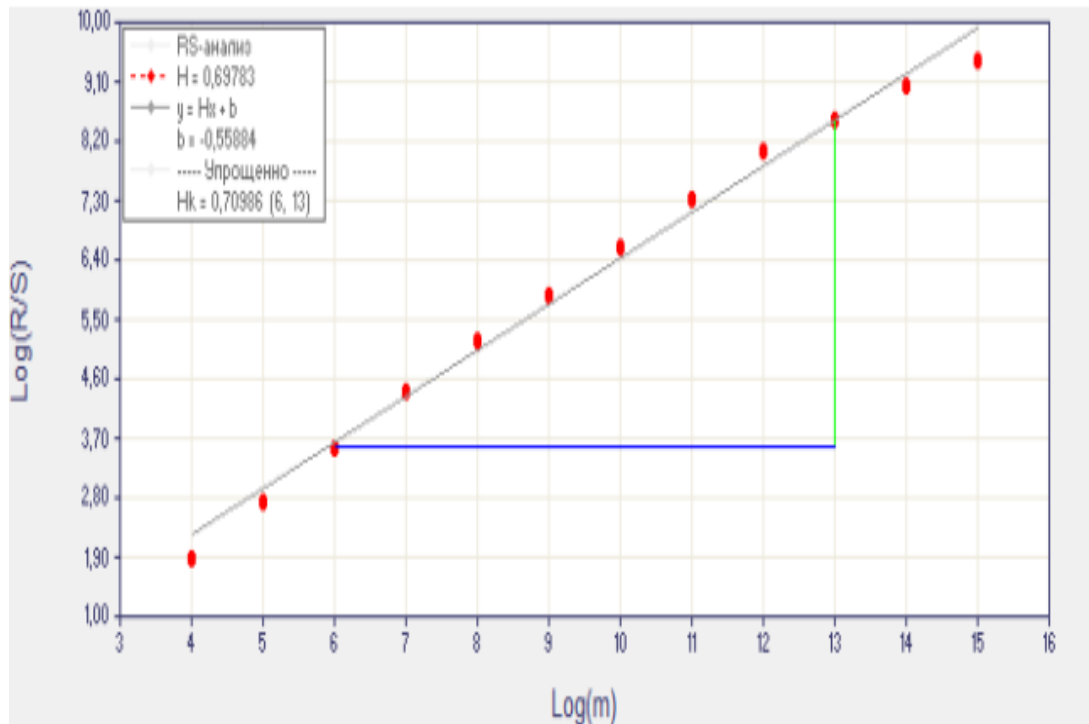


Рисунок 2.15 – Пример упрощенного расчета углового коэффициента

Отсюда можно сделать вывод, что погрешность расчета упрощенного метода не превышает 2...5%, что позволяет использовать его в условиях реального процессорного времени обработки, так как существенно сокращено количество операций расчета [71].

В ходе научного исследования предложен упрощенный метод расчета коэффициента самоподобности сигналов вихретокового датчика, упрощение заключается в том, что расчет производится не по всем возможным значениям R/S-статистики, а только по двум из них.

2.3.2. Фрактальный анализ профиля шлифованной поверхности

Способом распознавания вида дефекта служит значение фрактальной размерности и распределение значений, полученное в результате расчета. Результат расчета представляет собой график, отражающий вихретоковый образ дефекта, который получен при компьютерной обработке сигнала ВТД, причем в данном случае фрактальная размерность находится в пределах от 1 до 2.

Вычисления, выполненные по полученному профилю поверхности сигнала ВТД с помощью специализированного программного обеспечения, показали, что фрактальные размерности поверхности без дефектов и с дефектами достаточно различаются, так что можно сделать вывод, что они автоматизировано распознаются [100,101].

Для реализации фрактального анализа необходимо разделить на сигнал малые фрагменты, и в этих фрагментах оценивать фрактальную размерность D . Если эти участки находятся на изображении фрактала, имеющем одинаковую размерность, то и общая оценка их будет D постоянной по этим фрагментам. Таким образом, целесообразно использовать локальную фрактальную размерность. Во избежание искажения изображения целесообразно выбирать такой размер, чтобы он был не больше предполагаемого элемента изображения исследуемого объекта.

Одним из главных преимуществ фрактальной геометрии является отсутствие какой-либо нормировки. Во время применения данного метода нет необходимости нормировать исследуемый объект.

Для расчета фрактальной размерности рассчитанного профиля поверхности использован метод Херста, к достоинствам метода можно отнести устойчивость оценки относительно формы распределения, в том числе несимметричных распределений и распределений с длинными хвостами.

Расчёт показателя Херста H проводился по следующей формуле:

$$H = \frac{\log(R/S)}{\log(aN)},$$

где S – среднеквадратичное отклонение ряда наблюдений,

R – размах накопленного отклонения Z_u ,

N – число периодов наблюдений,

$a = \pi/2$.

Для анализа таких сигналов была специально написана программа, в которой производится расчет фрактальной размерности информационных сигналов, на рисунке 2.16 представлен дефект «ментальная трещина».

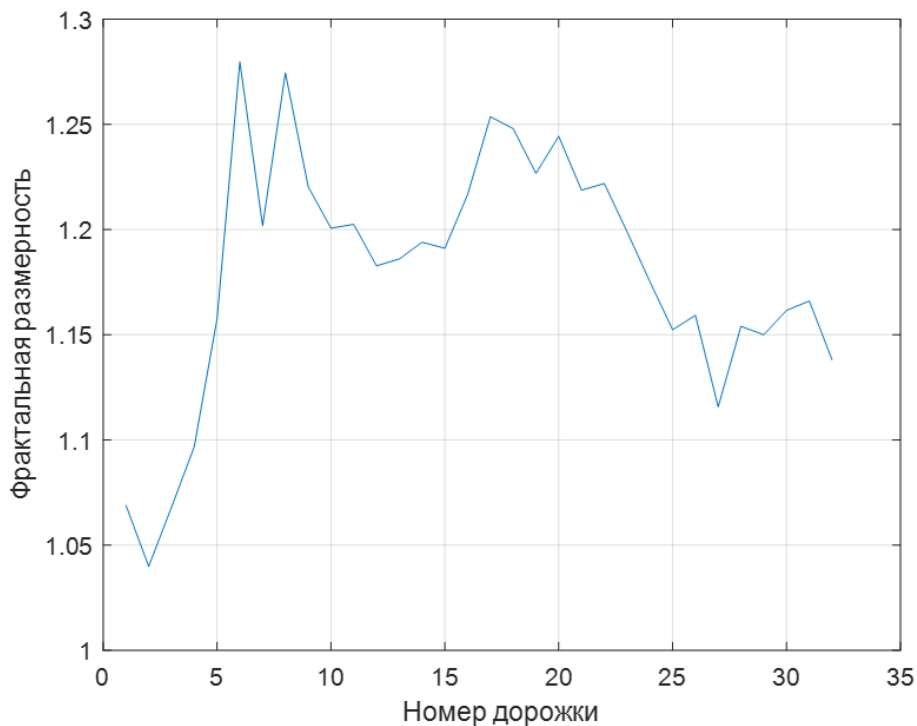


Рисунок 2.16 – Расположение фрактальных размерностей для дефекта «ментальная трещина»

Значения всех фрактальных размерностей информационных сигналов, полученных с вихретокового датчика для всех известных дефектов представлено в Приложении А.

Внедрение данного метода в систему контроля технологического процесса позволяет получить дополнительную информацию (тенденцию следовать по направлению тренда, кластерность, всплески интенсивности, фрактальность) с вихретокового датчика что приводит к повышению достоверности контроля.

2.4. Архитектура нейронной сети для диагностики дефектов

Интеллектуальные нейронные сети (ИНС) можно использовать несколькими способами. Они могут классифицировать информацию, группировать данные или прогнозировать результаты. ИНС можно использовать для решения целого ряда задач. К ним относятся анализ данных, преобразование речи в текст, использование программного обеспечения для распознавания объектов, контроль, диагностика и т.д.[22,23,72,73]

Согласно поставленным целям и сложности реализации нейронные сети делятся на типы по своей структуре.

Существует бесчисленное множество новых архитектур нейронных сетей, предлагаемых и обновляемых каждый день.

Ранее использование нейронных сетей было ограничено простыми проблемами классификации, но с тех пор они продвинулись до таких областей, как визуальные поисковые системы, системы распознавания, чат-боты.

Эволюция небольших нейронных сетей, которые могли обрабатывать малое количество данных, превратилась в архитектуры, состоящие из миллионов параметров, обученных на тоннах данных.

В рамках научного исследования рассмотрим стандартные нейронные сети и проведем выбор наиболее подходящей для решения поставленной задачи.

Персептрон. Персептрон является простейшей архитектурой нейронной сети.

Данный тип нейронной сети, которая принимает ряд входов, использует определенные математические операции на этих входах и производит выход. ИНС берет вектор вещественных значений входных данных, выполняет линейную комбинацию каждого атрибута с соответствующим весом, присвоенным каждому из них.

Взвешенные входные данные суммируются в одно значение и передаются через функцию активации.

Данные перцептронные единицы объединяются, чтобы сформировать большую архитектуру нейронной сети.

Типы перцептрона:

1. Однослойный: однослойный перцептрон может изучать только линейно разделимые шаблоны.

Модель однослойного перцептрона: один из самых простых типов ИНС состоит из сети с прямой связью и включает пороговую передачу внутри модели. Основная цель однослойной модели перцептрона состоит в анализе линейно разделимых объектов с бинарными исходами. Однослойный перцептрон может изучать только линейно разделимые шаблоны.

2. Многослойный: многослойные перцептроны могут узнать о двух или более слоях, имеющих большую вычислительную мощность.

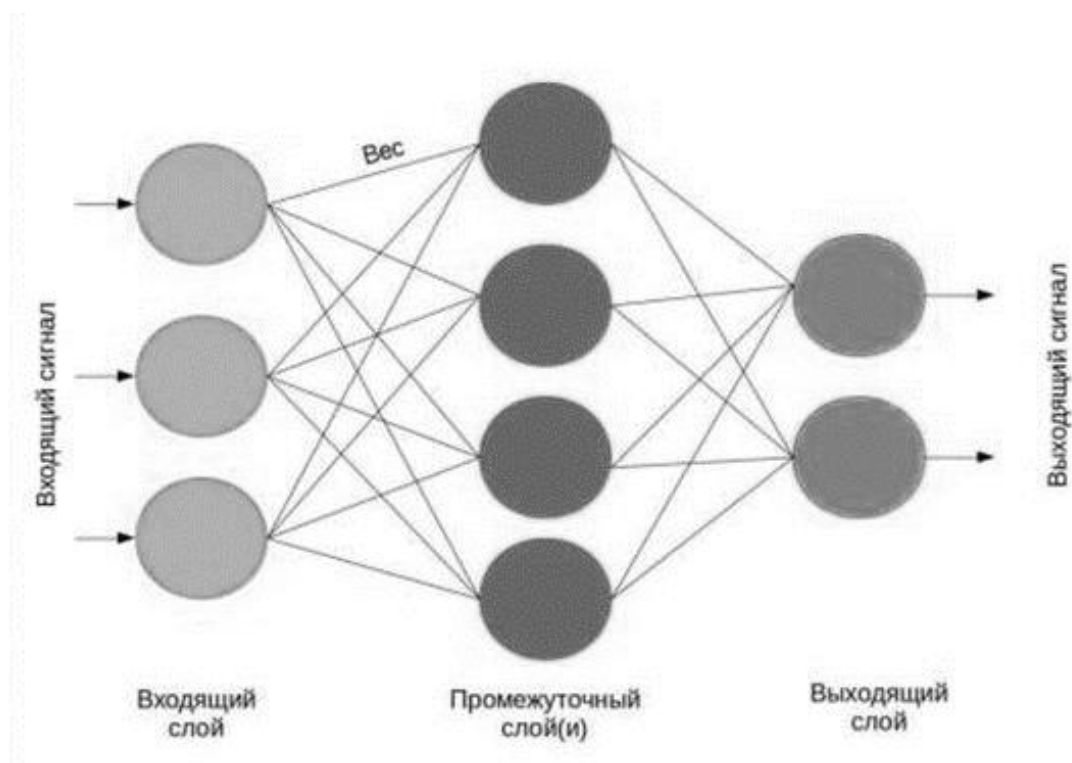


Рисунок 2.17 – Перцептрон

Модель перцептрона также классифицируется как один из лучших и наиболее специфических типов нейронных сетей. Будучи контролируемым алгоритмом обучения бинарных классификаторов, также можно рассматривать

как однослойную нейронную сеть с четырьмя основными параметрами: входными значениями, весами и смещением, чистой суммой и функцией активации.

Преимущества:

1. Многослойная модель персептрона может решать сложные нелинейные задачи.
2. Хорошо работает как с небольшими, так и с большими входными данными.
3. Помогает получать быстрые прогнозы после обучения.
4. Помогает получить одинаковое соотношение точности с большими и малыми данными.

Недостатки:

1. В многослойной модели персептрона вычисления требуют много времени и сложны.
2. Трудно предсказать, насколько зависимая переменная влияет на каждую независимую переменную.
3. Функционирование модели зависит от качества обучения

Многоуровневая нейронная сеть, информация передается в прямом направлении — слева направо.

Информация поступает внутрь модели через входной слой, проходит через ряд скрытых слоев и, наконец, поступает в выходной слой. Эта архитектура нейронных сетей носит прямой характер — информация не зацикливается на двух скрытых слоях.

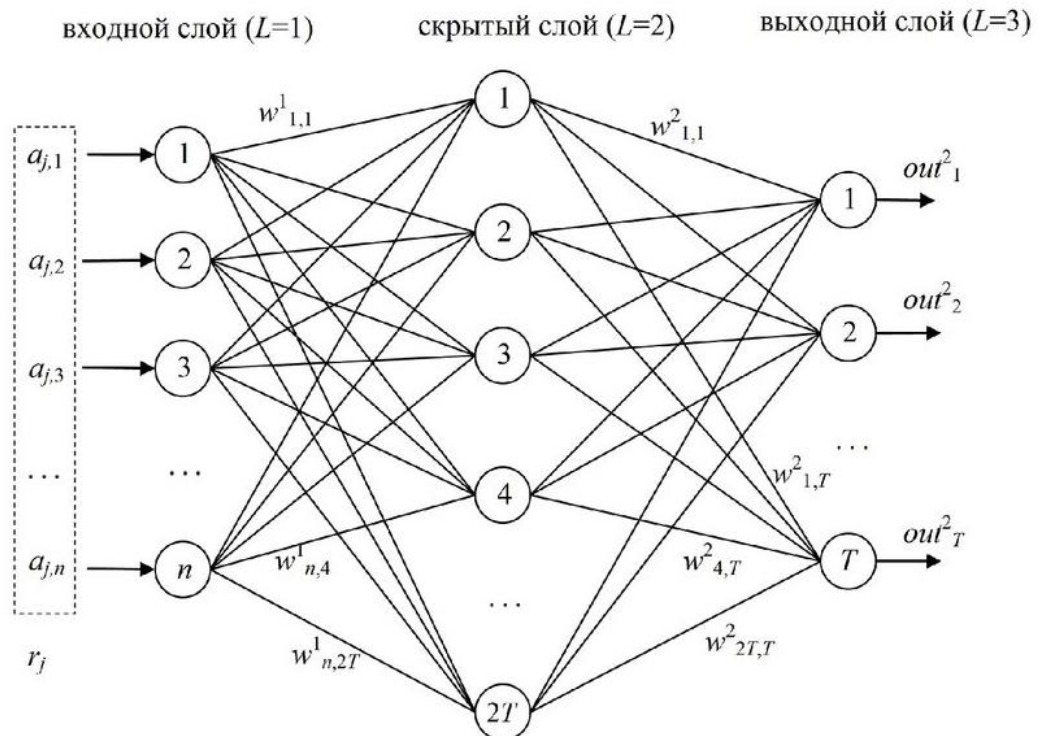


Рисунок 2.18 – Многоуровневая нейронная сеть

Остаточные сети

Очень глубокие нейронные сети чрезвычайно трудно обучить из-за исчезающих и взрывающихся градиентных проблем.

Такие сети предоставляют альтернативный путь для потока данных, чтобы сделать процесс обучения намного быстрее и проще.

Это отличается от подхода «прямая связь» более ранних архитектур нейронных сетей.

Основная идея НС заключается в том, что более глубокая сеть может быть сделана из неглубокой сети путем копирования веса из неглубоких аналогов с помощью сопоставления идентичности.

Рекуррентные нейронные сети (РНС)

Основная идея рекуррентных нейронных сетей заключается в сохранении ранее рассчитанных выходных данных для будущего прогнозирования. Это означает, что как только функции выполняются нейронами, полученный выход сохраняется на будущее. Это заставляет каждый нейрон действовать как клетка

памяти при выполнении вычислений. Ранее рассчитанные результаты приводятся в качестве входных данных для будущих процессов.

Базовая архитектура глубокого обучения имеет фиксированный размер входных данных, и это действует как блокировщик, где размер входных данных не является фиксированным. Кроме того, решения, принятые моделью, были основаны на текущих входных данных без памяти о прошлом.

Рекуррентные нейронные сети очень хорошо работают с последовательностями данных в качестве входных данных. Их функциональность можно увидеть в решении проблем анализа настроений, спам-фильтров, проблем временных рядов, таких как прогнозирование продаж, прогнозирование фондового рынка и т. д.

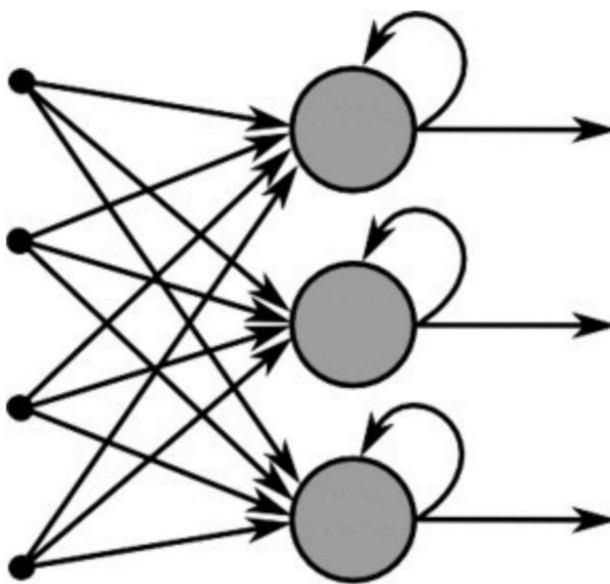


Рисунок 2.19 – Рекуррентные нейронные сети

Рекуррентные нейронные сети обладают способностью запоминать то, что они узнали в прошлом, и применять это в будущих прогнозах.

Входные данные представлены в виде последовательных данных, которые подаются в РНС, который имеет скрытое внутреннее состояние, которое обновляется каждый раз, когда он считывает следующую последовательность данных на входе.

Внутреннее скрытое состояние будет передано обратно в модель. РНС производит некоторый вывод на каждой метке времени.

Важнейшей частью РНС является память.

Радиальная базисная сеть (РБС)

Нейронная сеть радиальной базисной функции широко применяется в области аппроксимации функций, распознавания образов, обработки сигналов и идентификации системы благодаря своей глубокой физиологической основе, простой сетевой структуре, быстрой способности к обучению и отличной производительности приближения.

РБС в основном представляет собой трехуровневую прямую сеть, состоящую из входных, скрытых и выходных слоев. Это принципиально отличается от большинства архитектур нейронных сетей, которые состоят из многих слоев и обеспечивают нелинейность за счет рекуррентного применения нелинейных функций активации. Входной слой получает входные данные и передает их скрытому слою, где происходит вычисление. Скрытый слой нейронной сети радиальных базисных функций является самым мощным и сильно отличается от большинства нейронных сетей. Выходной слой предназначен для задач прогнозирования, таких как классификация или регрессия.

Сети РБС могут научиться аппроксимировать базовый тренд, используя множество гауссовских/колоколообразных кривых.

Сеть РБС похожа на 2-уровневую сеть, вход которой полностью подключен к скрытому слою. Затем используются выходные данные скрытого слоя.

Функция Гаусса, описывающая нормальное распределение, выглядит следующим образом:

$$\varphi(x) = \varphi(\|x - c_i\|) = \exp\left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right)$$

σ - параметр, от значения которого зависит ширина функции.

Полученное решение, представляющее аппроксимирующую функцию в многомерном пространстве в виде взвешенной суммы локальных базисных радиальных функций ($F(x) = f_1 + f_2 + \dots + f_k$), может быть интерпретировано радиальной нейронной сетью [88], представленной на рисунке 2.20.

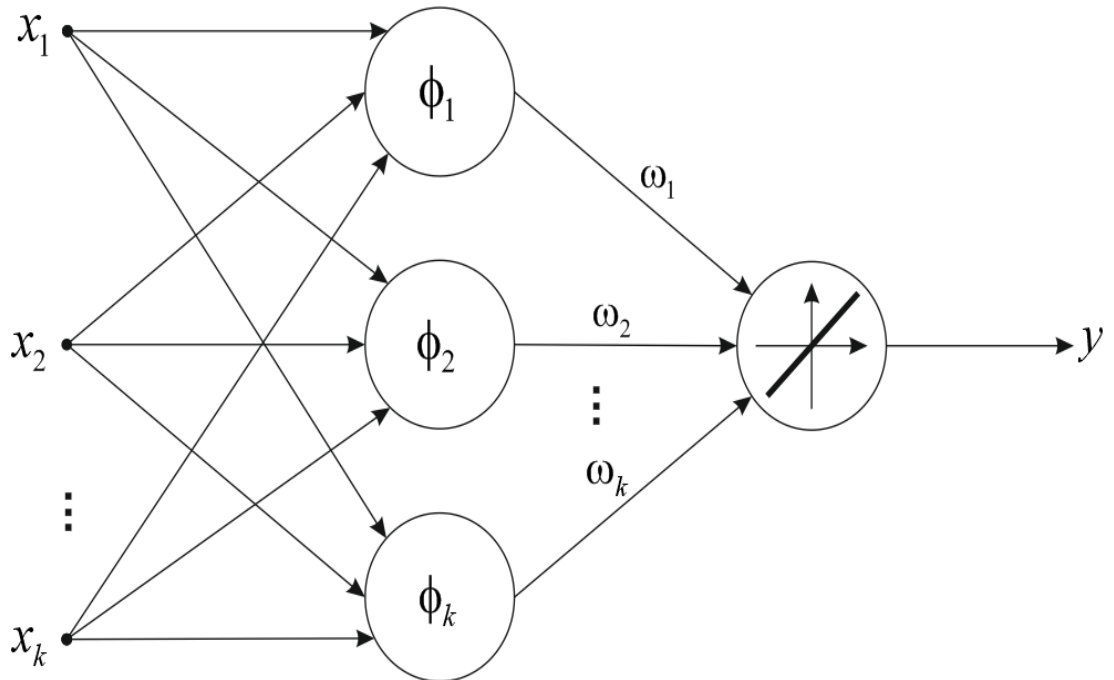


Рисунок 2.20 – Структура РБС

Преимущества РБС:

- простой дизайн;
- хорошее обобщение;
- более быстрое обучение;
- только один скрытый слой;
- прямая интерпретация значения или функции каждого узла в скрытом

слое.

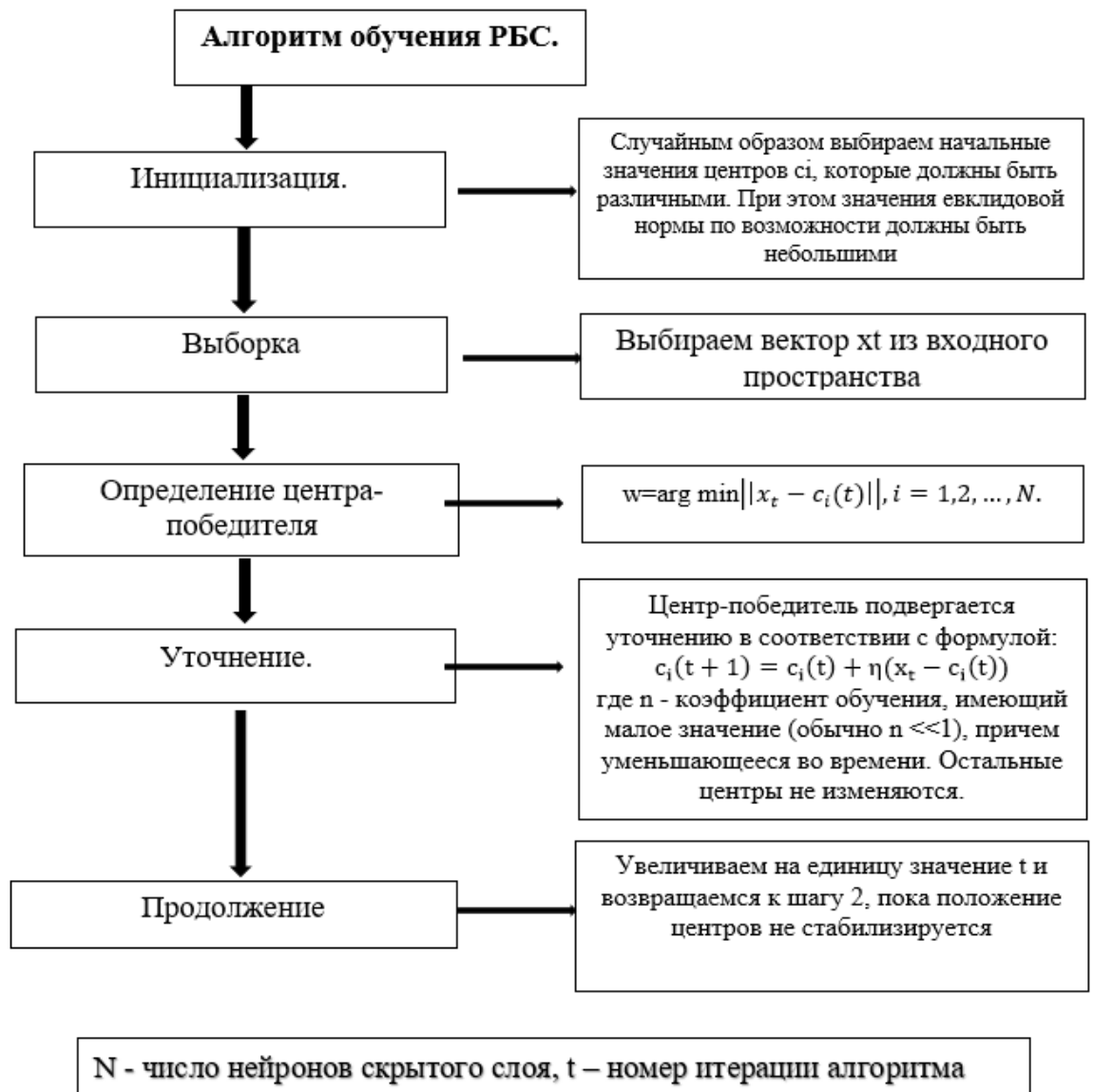


Рисунок 2.21 – Алгоритм обучения РБС

В результате проведенного научного исследования для математического описания вихретокового контроля и диагностики дефектов поверхностей деталей подшипников применяется выбор структуры и процедуры обучения нейронной сети.

Рассмотрим обучение двухслойной радиальной базисной сети с линейными функциями активации для распознавания выбранного дефекта «ментальная трещина».

На рисунке 2.21 представлена архитектура радиальной базисной нейронной сети.

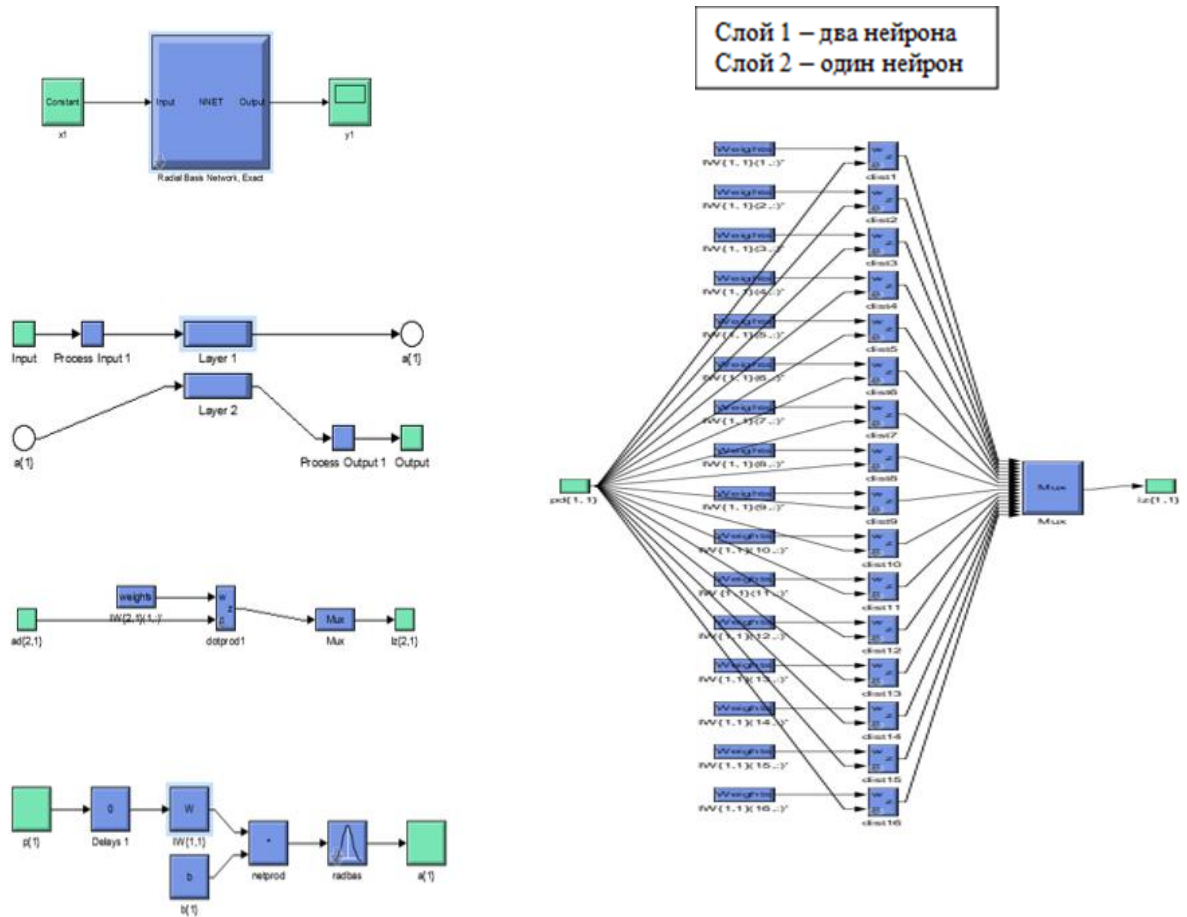


Рисунок 2.22 – Архитектура радиальной базисной нейронной сети

Для формирования выходной обучающей выборки проводилось ранжирование дефектов по значению их фрактальной размерности и ранжированные номера дефектов использовались в качестве выходной обучающей выборки. Входная обучающая выборка формировалась из вычисленных фрактальных размерностей дефектов.

Ошибка обучения для 16 рассматриваемых дефектов практически равна нулю и составляет значение порядка 10^{-12} .

Таким образом, доказана принципиальная возможность диагностики дефектов по фрактальной размерности с использованием интеллектуальных нейронных сетей.

Высокая степень автоматизации вихретокового контроля поверхностей качения деталей подшипников позволяет существенно снизить влияние человеческого фактора при определении вида дефекта. Указанное способствует

принятию решения либо по корректировке режима обработки, либо по ремонтно-профилактическим мероприятиям на станках, что позволит значительно снизить появление бракованных деталей.

Стоит отметить, что обученная нейронная сеть позволяет повысить информативность фрактального анализа и повысить качество распознавания дефектов поверхности подшипника, возникающих при его производстве.

2.5. Выводы

1. В результате научного исследования было предложено осуществлять адаптивную фильтрацию экспериментальных данных с использованием сингулярного спектрального анализа, что позволило исключить влияние помех на достоверность контроля, и сформировать валидированные обучающие выборки для проведения фрактального анализа и обучения нейронных сетей.

2. Предложен упрощенный метод расчета коэффициента самоподобности информационных сигналов с вихретокового датчика для получения дополнительной информации.

3. Разработано методическое обеспечение для автоматического распознавания одиночных дефектов деталей подшипников при вихретоковом контроле с определением фрактальной размерности информационных сигналов, а также представлено признаковое пространство, позволяющее распознавать основные дефекты.

4. Выполнен фрактальный анализ полученных 3D -поверхностей и рассчитана их фрактальная размерность, позволившая получить интегральную оценку качества поверхностей, повысив тем самым достоверность последующей диагностики дефектов.

5. Сформирована радиальная базисная сеть и проведено её обучение, позволившее обеспечить высокую достоверность диагностирования дефектов.

ГЛАВА 3. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ

3.1. Алгоритм формирования определения локальных дефектов

В рамках диссертационного исследования для решения поставленных задач разработан алгоритм распознавания всех известных локальных дефектов шлифованных поверхностей деталей подшипников, возникающих при их производстве.

Рассматриваемый алгоритм реализован в специализированном программном модуле, позволяющим анализировать полученные массивы данных в виде файлов, проводить сингулярную фильтрацию, формировать профиль поверхности, проводить расчет фрактальной размерности информационных сигналов, полученных с вихретокового датчика, для распознавания одиночных дефектов колец подшипников с применением статистических характеристик. Также применение интеллектуальной нейронной сети для диагностирования наличия и вида дефекта позволит обосновать применение методов фрактальной геометрии в обработке сигналов и в диагностировании известных дефектов.

Алгоритм формирования определения локальных дефектов по фрактальной размерности информационных сигналов с вихретокового датчика по дефектному профилю заключается в следующем:

1. Формирование экспериментальных данных полученных в виде файлов, содержащих значения информационных сигналов токов и фаз с дефектами.
2. Визуализация экспериментальных данных для каждого дефекта.
3. Адаптивная фильтрация экспериментальных данных.
4. Определение профиля поверхности.

5. Проведение фрактального анализа полученных 3D -поверхностей и вычисление их фрактальной размерности.

6. Обучение интеллектуальной нейронной сети для распознавания локальных дефектов.

7. Реализация алгоритма распознавания в SCADA-системе TRACE MODE.

Анализировались следующие известные дефекты, которые представлены на рисунке 3.1:

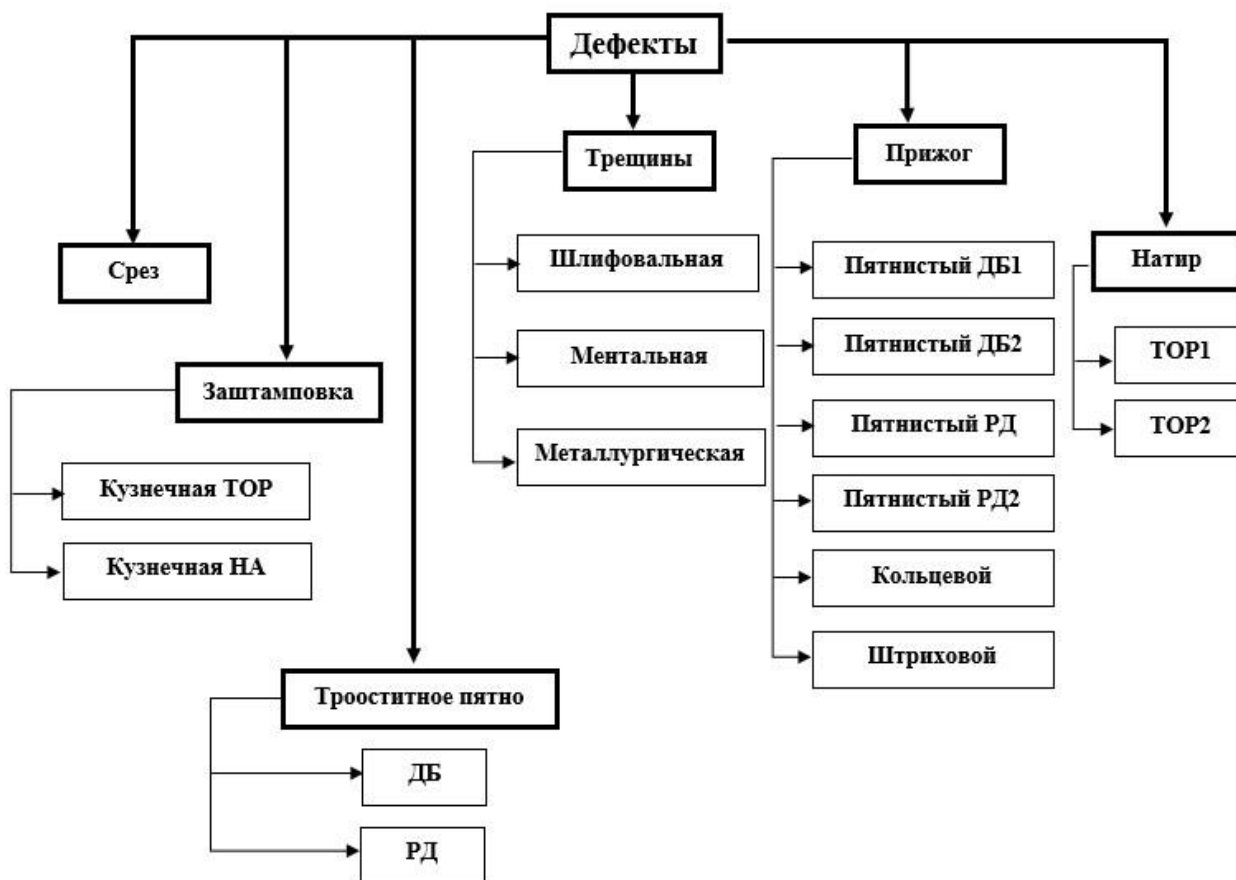


Рисунок 3.1 – Основные виды дефектов

Для обеспечения достоверности расчеты выполнены в каждом случае для 30 дефектов одного вида.

3.2. Адаптивная фильтрация экспериментальных данных, полученных при вихретоковом контроле, для основных локальных дефектов

В процессе сканирования поверхности подшипника на выходах вихретокового датчика формируются сигналы амплитуды и фазы его тока.

Осциллограммы сигналов представлены на рисунке 3.2-3.5

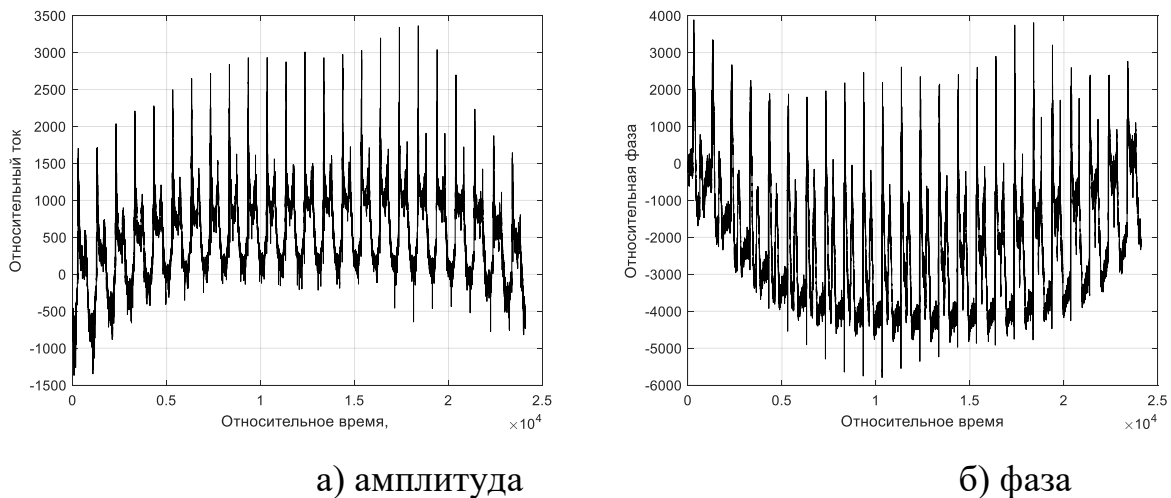


Рисунок 3.2– Сигналы амплитуды и фазы на выходе вихретокового датчика (Шлифовальная трещина).

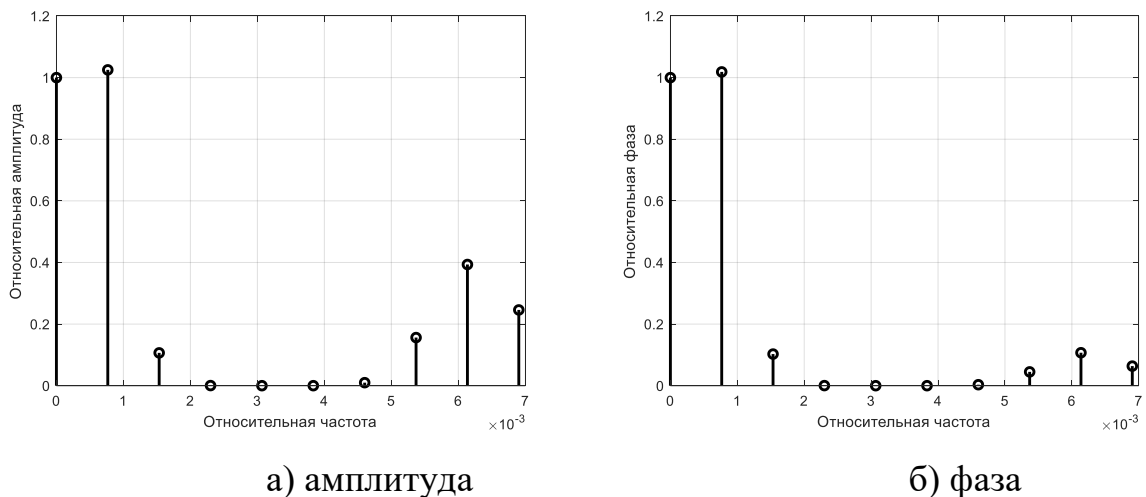
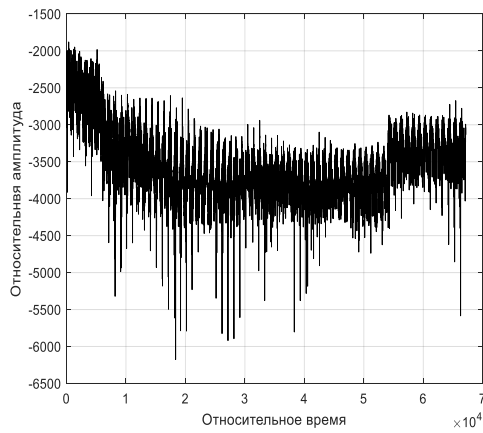
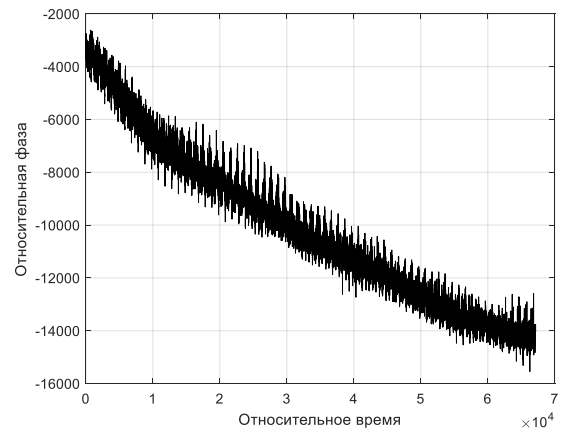


Рисунок 3.3– Спектры амплитуды и фазы на выходе вихретокового датчика (Шлифовальная трещина)

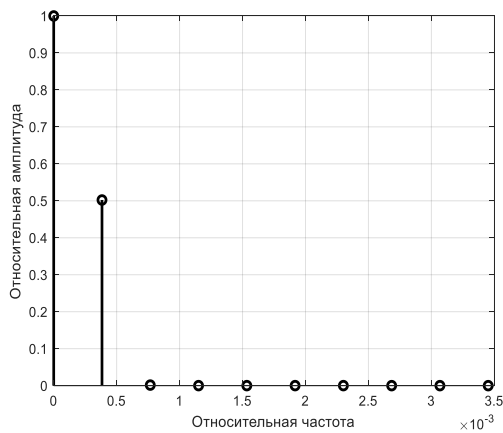


а) амплитуда

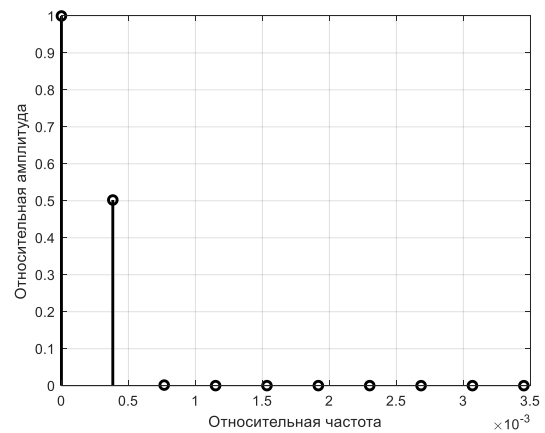


б) фаза

Рисунок 3.4 – Сигналы амплитуды и фазы на выходе вихретокового датчика (Штриховой прижог)



а) амплитуда



б) фаза

Рисунок 3.5 – Спектры амплитуды и фазы на выходе вихретокового датчика (Штриховой прижог)

Анализ спектрограмм показывает, что сигналы амплитуды и фазы содержат мощную низкочастотную составляющую, не позволяющую выделять дефекты поверхности.

На рисунках 3.6 и 3.7 показаны характерные результаты визуализации некоторых сигналов изменения амплитуды и фазы на выходе вихретоковых датчиков.

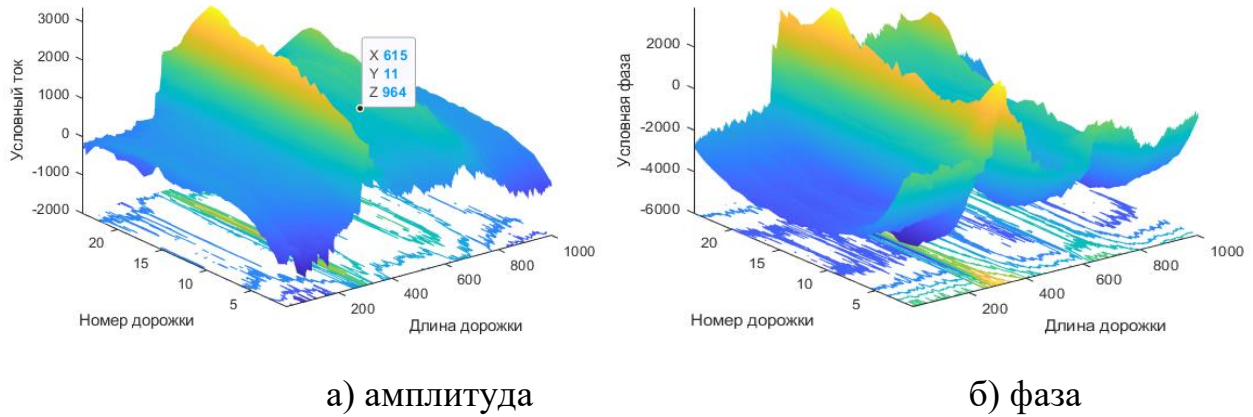


Рисунок 3.6 – Сигналы амплитуды и фазы на выходе вихретокового датчика (Шлифовальная трещина)

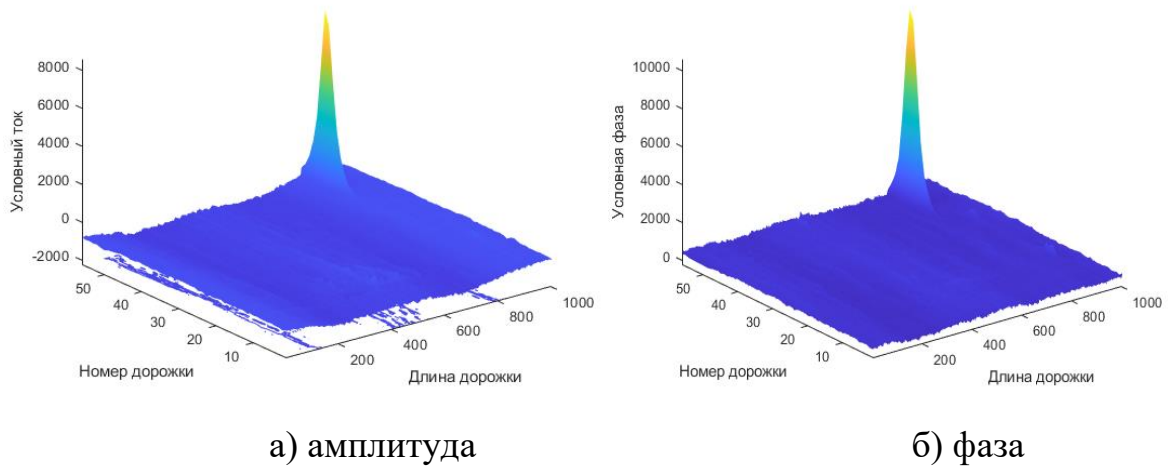


Рисунок 3.7 – Сигналы амплитуды и фазы на выходе вихретокового датчика (Металлургическая трещина)

Анализ этих сигналов (рисунок 3.6) позволяет сделать вывод, что некоторые сигналы содержат сильную низкочастотную помеху, обусловленную «плаванием» датчика над сканируемой поверхностью. Для повышения точности определения дефектов необходимо осуществить низкочастотную фильтрацию сигналов датчика.

Вместо традиционных низкочастотных фильтров, вносящих амплитудные и фазовые искажения в фильтруемый сигнал, предлагается использовать адаптивную сингулярную фильтрацию, основанную на сингулярном спектральном анализе [84].

Предлагается вместо сингулярного спектрального анализа временных рядов (рисунки 3.2 и 3.4) [2] проводить сингулярное разложение матриц амплитуд и токов (рисунки 3.6 и 3.7), а затем по теореме Эккарта — Янга [130] приближать эти матрицы матрицами меньшего ранга. В аналогии с методом главных компонент приближение осуществляется из условия

$$\lambda_i > \sigma(l), \quad (3.1)$$

где λ_i - собственные числа матриц амплитуды и фазы $\sigma(l)$ - среднеквадратичное отклонение собственных чисел.

Неравенство (3.1) имеет тенденцию занижать количество значимых главных компонент, как правило, их число не превышает 4.

На рисунках 3.8 - 3.9 показаны отфильтрованные сигналы амплитуды и фазы на выходе вихретокового датчика двух дефектов: шлифовальная и металлургическая трещины.

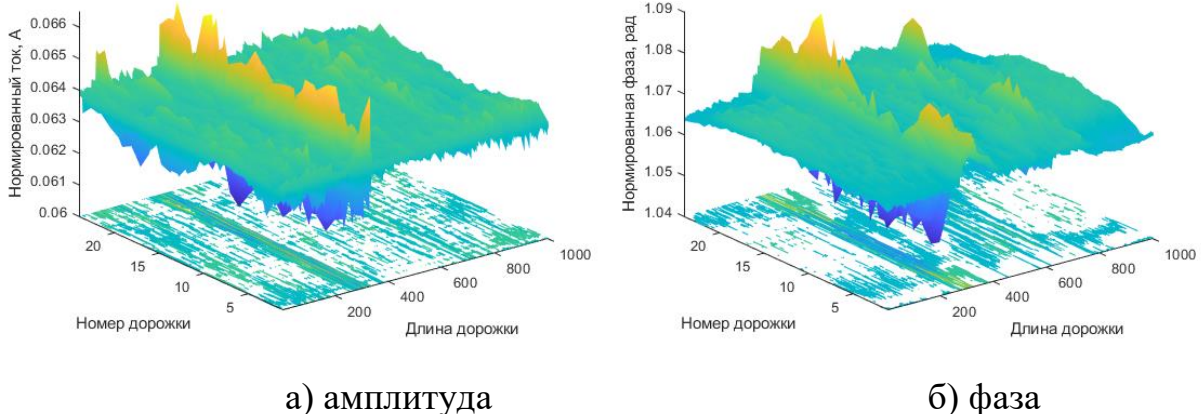


Рисунок 3.8 – Отфильтрованные сигналы амплитуды и фазы на выходе вихретокового датчика (шлифовальная трещина)

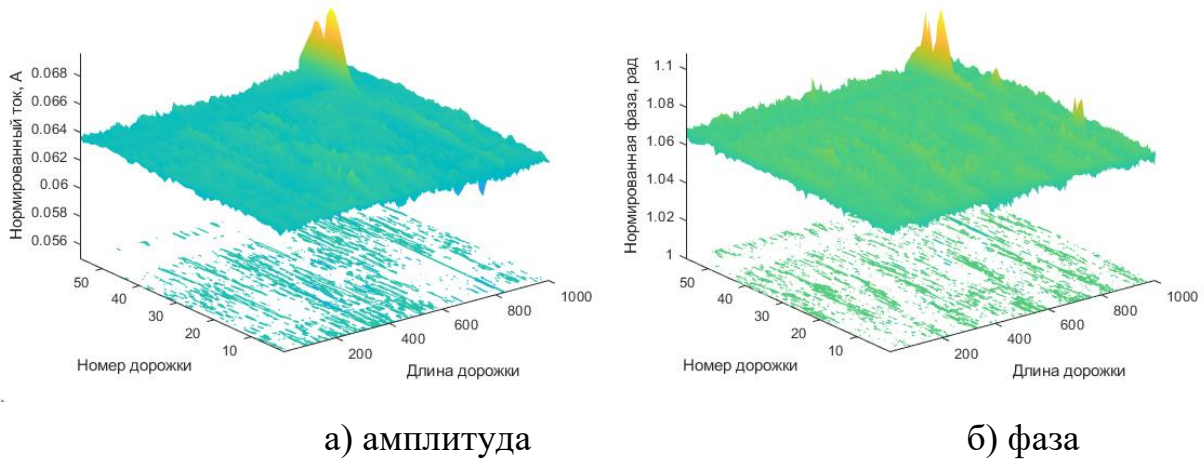


Рисунок 3.9 – Сигналы амплитуды и фазы на выходе вихретокового датчика (металлургическая трещина)

Алгоритм сингулярной фильтрации.

1. Чтение файла из массива данных.
2. Выделение низкочастотных частей.
3. Формирование матрицы.
4. Проведение сингулярного разложения.

Программа фильтрации **fil.m** приведена в Приложении Б.

Введение сингулярной фильтрации позволило полностью избавиться от низкочастотных помех, повысив, тем самым, достоверность выявления дефектов.

3.3. Построение профиля поверхности локальных дефектов

В результате фильтрации сигналов была выделена дефектная область каждой неоднородности, возникающей при производстве подшипников, и сформирован дефектный профиль.

Для проверки разработанной в п. 2.3 методики определения профиля поверхности смоделируем работу вихретокового датчика используя в качестве исходных данных для расчета, смоделированный программой **rasprofil.m**, профиль поверхности одной сканируемой дорожки с $Ra = 0,5$ мкм, что в среднем

соответствует шероховатости шлифованной поверхности. Диаграмма профиля показана на рисунке 3.10.

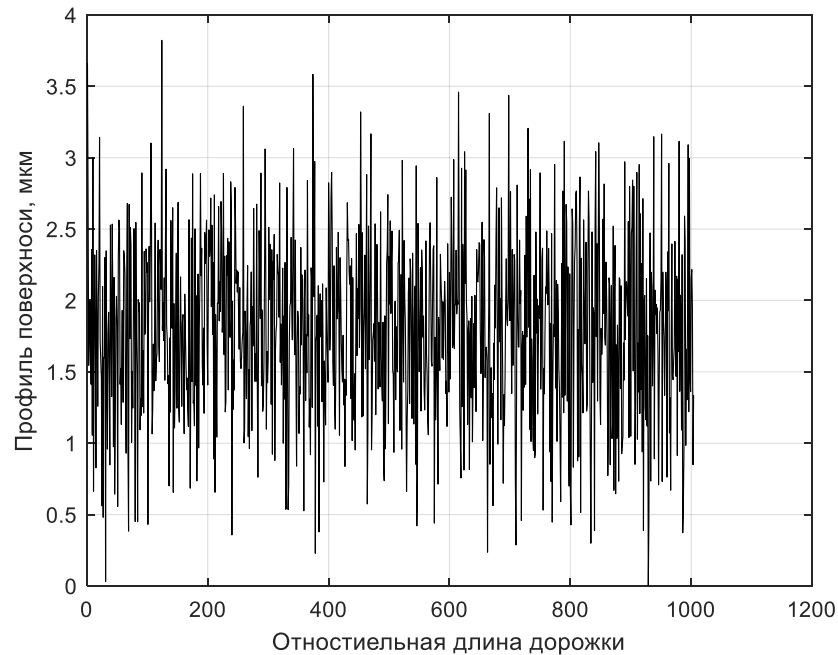


Рисунок 3.10 – Профиль поверхности сканируемой поверхности подшипника

В соответствии с методикой, приведённой в п. 2.3, используя аппроксимирующие зависимости (2.18) и (2.19), вычислим вносимые активное и индуктивные сопротивления датчика рисунки 3.3 и 3.4.

Проведём калибровку вибродатчика при сканировании им шлифованной поверхности с $Ra=0,5$ (программа kkor.m). Примем $Ra=0,5\text{мкм}$, что в среднем соответствует шероховатости колец подшипников и сгенерируем случайную величину к которой $Ra=0,5$ среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины(программа gasprofil.m).

На рисунке 3.11 представлен фрагмент реализации случайной величины

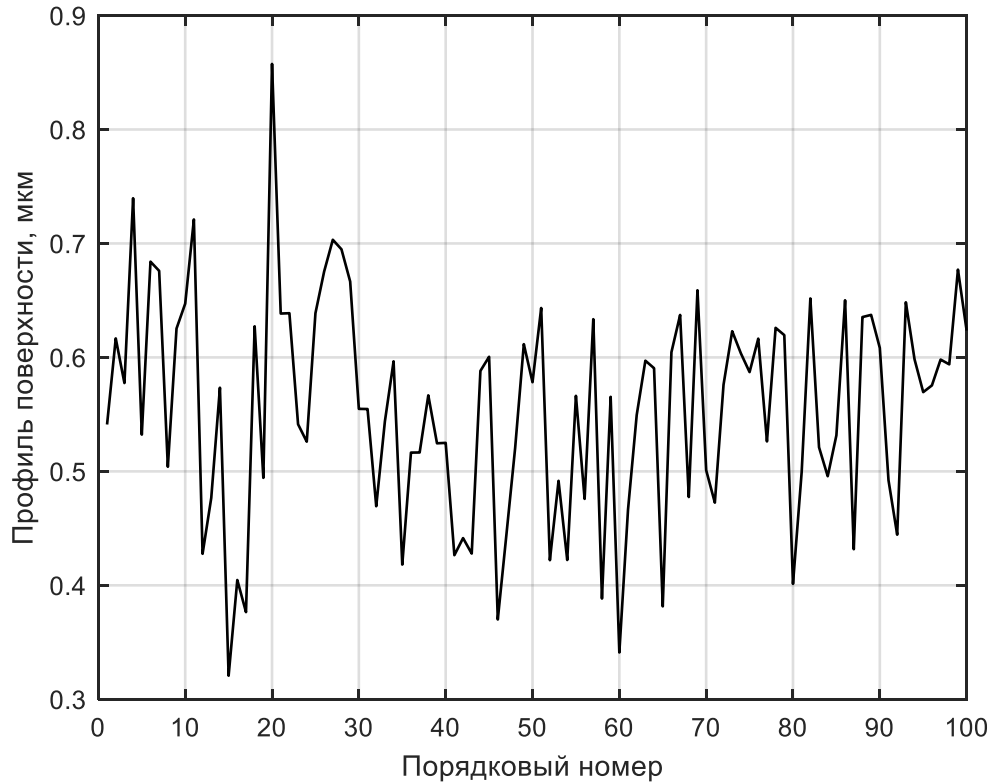


Рисунок 3.11 – Фрагмент смоделированного профиля поверхности дорожки подшипника

По известному профилю поверхности с помощью аппроксимирующих формул вычисляются активное и индуктивное сопротивления датчика, а затем по найденным сопротивлениям с помощью выражений для АЧХ ((2.12) и ФЧХ (2.22) вычисляется амплитуда и фаза сигналов вихретокового датчика.

На рисунках 3.12 – 3.13 ток и фаза датчика при сканировании поверхности

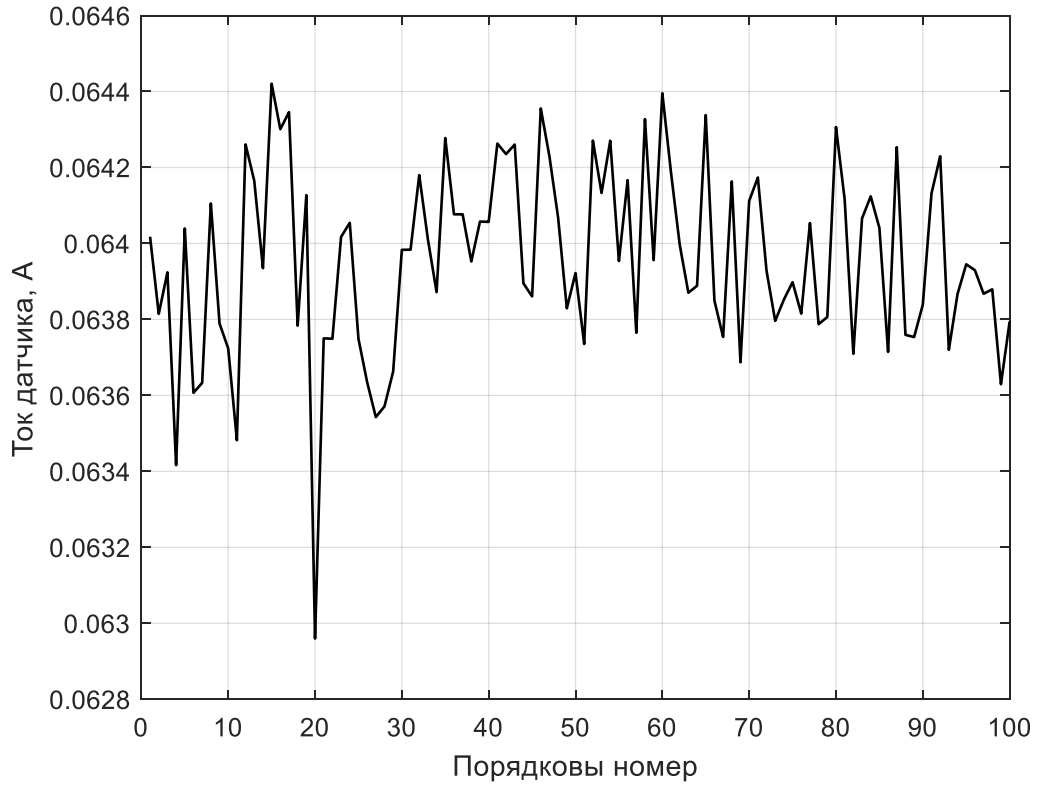


Рисунок 3.12 – Ток датчика при сканировании поверхности

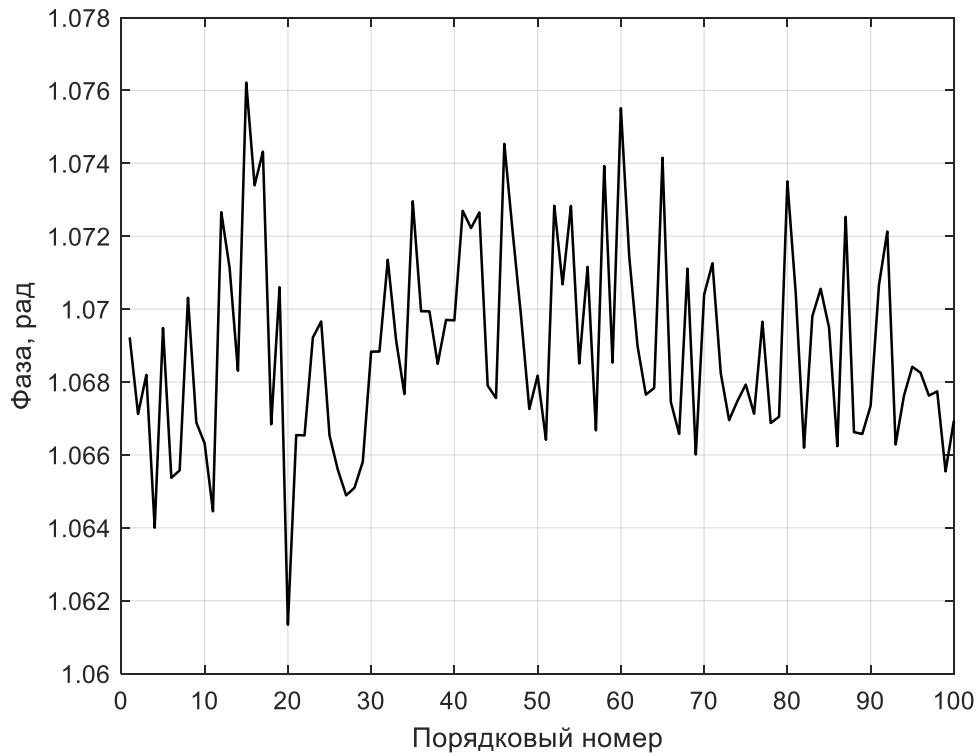


Рисунок 3.13 – Фаза датчика при сканировании поверхности

Программа расчета приведена в Приложении Б (программа kkor.m).

После проведения вычислительного эксперимента было осуществлено приведение сигналов реального датчика, сканирующего шлифованные поверхности подшипников, и виртуального датчика, характеристики которого получены в результате вычислительного эксперимента.

Приведённые сигналы (ток и фаза) реального датчика через параметры виртуального датчика были пересчитаны в профиль шлифованной поверхности программой `main.m`, приведённой в Приложении Б и показан на рисунке 3.14.

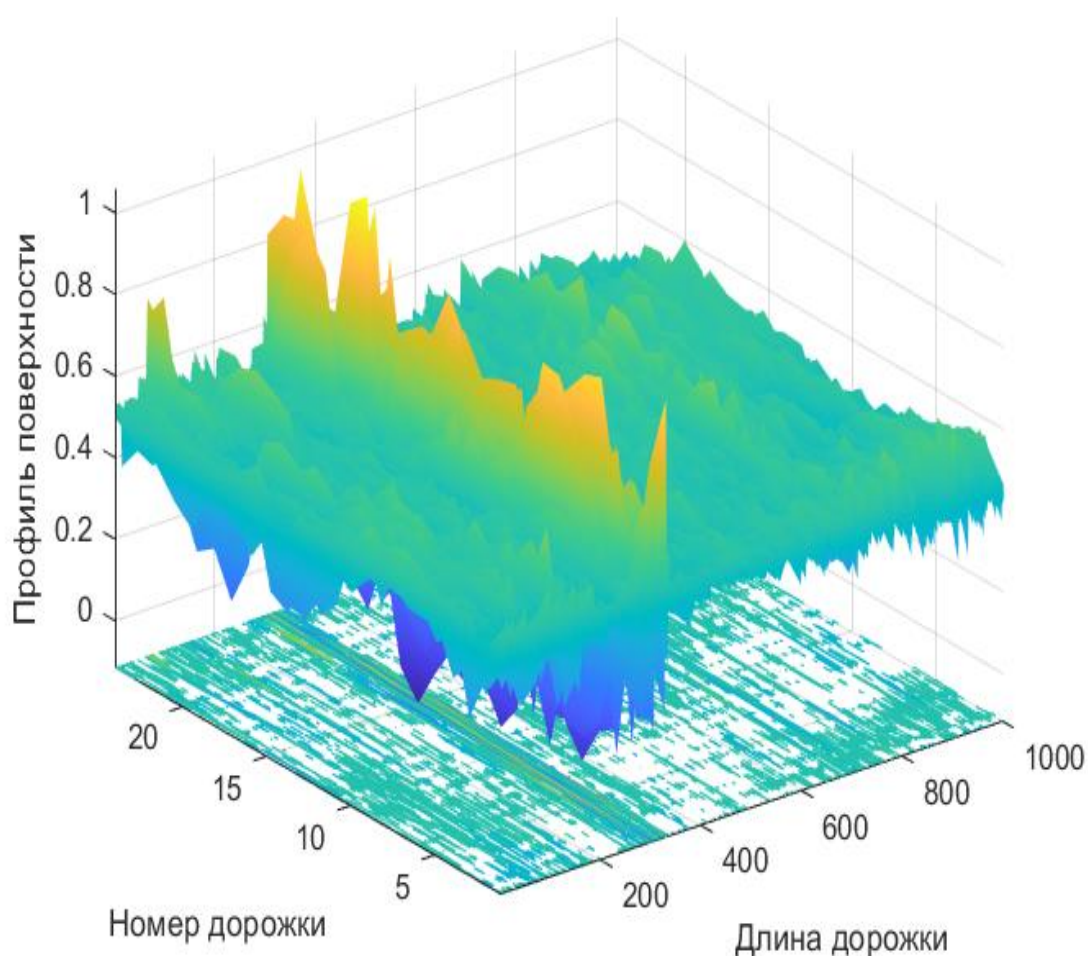


Рисунок 3.14 – Профиль поверхности

Определение профиля поверхности осуществляется по результатам, полученным в главе 2, по следующему алгоритму:

1. Сканируется контролируемая поверхность и на рабочей частоте датчика регистрируются сигналы амплитуды и фазы на выходе вихретокового датчика A и φ .

2. По выражениям (2.23) и (2.24) вычисляются индуктивность L_x и активное сопротивление R_x катушки датчика.

3. По выражениям (2.18) и (2.19) вычисляется профиль поверхности.

Очевидно, что полученный профиль является результатом фильтрации истинного профиля вихретоковым датчиком методом скользящего среднего. Порядок фильтра определяется площадью активной поверхности датчика, взаимодействующей с исследуемым материалом.

3.4. Расчет фрактальной размерности локальных дефектов

Для контроля однородности структуры поверхностного слоя подшипников (колец и роликов), так как дефекты в них снижают надежность работы подшипников, предлагается автоматическое распознавание дефектов поверхностей качения с применением метода фрактальной размерности.

В этом случае признаком, позволяющим осуществить распознавание вида дефекта, служит фрактальная размерность графика, отражающего вихретоковый образ дефекта, полученного при компьютерной обработке сигнала ВТД, причем в данном случае фрактальная размерность находится в пределах от 1 до 2.

Для обеспечения достоверности, расчеты выполнены в каждом случае для основных дефектов одного вида. В этом случае доверительный интервал для значений фрактальной размерности составляет 0,02.

По экспериментальным значениям профилограммы был проведен проверочный расчет, показавший полное совпадение расчетной и экспериментальной профилограмм.

Расчет фрактальной размерности осуществлялся по следующему алгоритму:

1. Формируется временной ряд $X=[x_1, x_2, \dots, x_N]$, для которого рассчитывается фрактальная размерность.

2. Исходный ряд X разбивается на периоды различной длины.

3. Для каждого разбиения исходного ряда на периоды вычисляются оценки математического ожидания mX и среднеквадратичного отклонения sX .

4. Вычисляется накопленное отклонение ряда от его среднего значения

$$Z_u = \sum_{i=1}^N (x_i - mX). \quad (3.2)$$

5. Вычисляется размах накопленного отклонения

$$R = \max(Z_u) - \min(Z_u). \quad (3.3)$$

6. По формуле вычисляется показатель Херста.

$$H = \frac{\log(R/S)}{\log(aN)},$$

где S – среднеквадратичное отклонение ряда наблюдений, R – размах накопленного отклонения Z_u , N – число периодов наблюдений, $a = \pi/2$.

7. Рассчитывается фрактальная размерность D

$$D=2-H. \quad (3.4)$$

Расчет фрактальных размерностей для различных типов неисправностей приведён в Приложении А диссертации.

Полученные фрактальные размерности служат для формирования входной обучающей выборки радиальной базисной нейронной сети. Входная обучающая выборка формируется в следующей последовательности:

1. На траекторной матрице сканируемой поверхности выбирают дорожки, на которых фиксируется дефектная область.

2. Для выбранных дорожек рассчитываются фрактальные размерности.

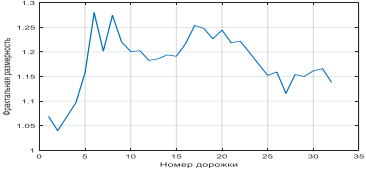
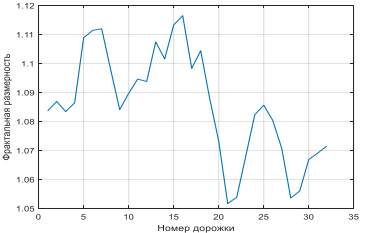
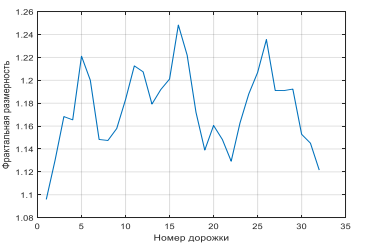
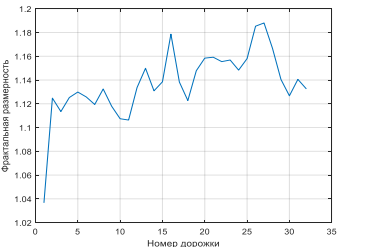
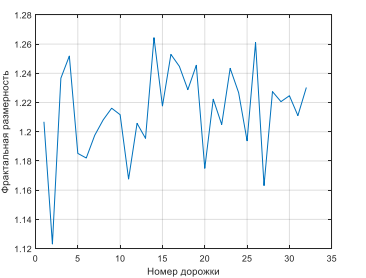
3. Из совокупности полученных для каждого дефекта фрактальных размерностей формируется матрица входной обучающей выборки.

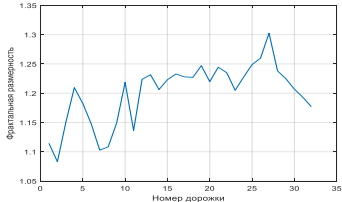
Для формирования выходной обучающей выборки дефекты ранжируются по среднему значению соответствующих им фрактальных размерностей. Номера ранжируемых дефектов образуют выходную обучающую выборку.

Анализ графика средних значений фрактальных размерностей позволяет сделать вывод о репрезентативности использования фрактальных размерностей для диагностирования дефектов шлифования дорожек подшипников.

В таблице 3.1 представлены основные дефекты и значения фрактальной размерности.

Таблица 3.1 Значения фрактальной размерности

№	Название дефекта	Распределение фрактальной размерности	Значение фрактальной размерности
1	Ментальная трещина		1,19
2	Натир		1,09
3	Пятнистый прижог		1,2
4	Срез		1,14
5	Трооститное пятно		1,22

6	Шлифовальная трещина		1,21
---	----------------------	--	------

На рисунке 3.15 представлено распределение фрактальной размерности по различным видам дефектов

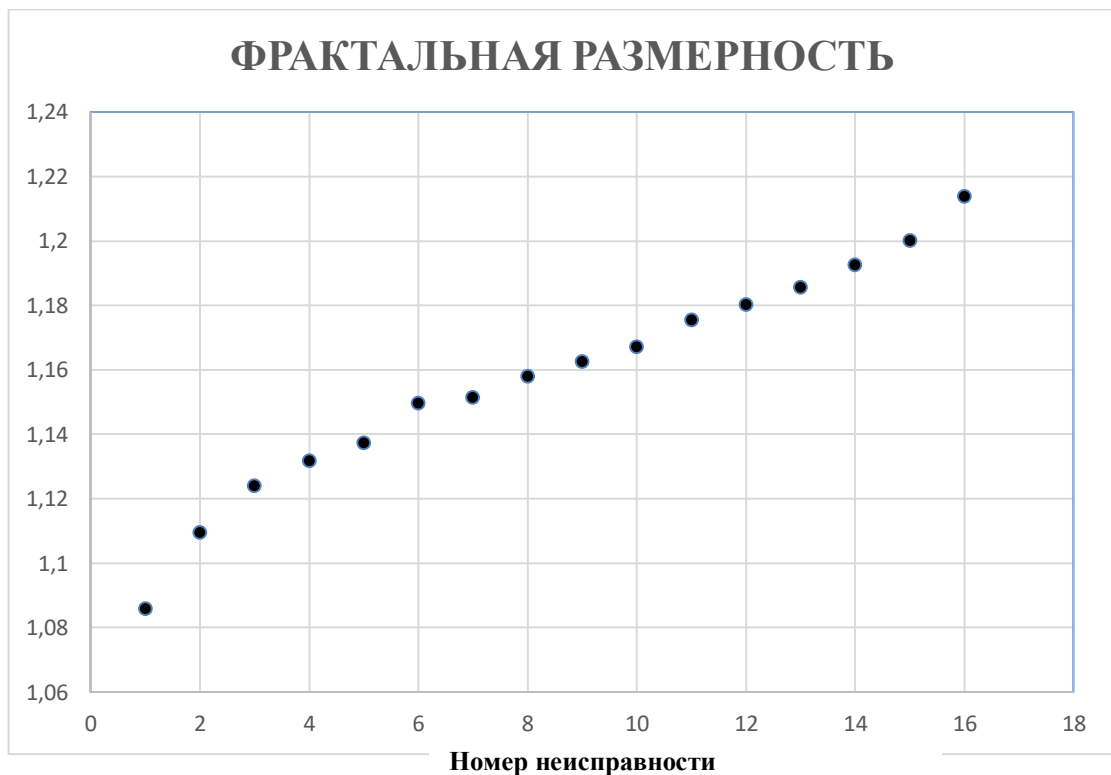


Рисунок 3.15 – Фрактальные размерности ранжируемых неисправностей по различным видам дефектов

Высокая степень автоматизации вихретокового контроля поверхностей качения деталей подшипников позволяет существенно снизить влияние человеческого фактора при определении вида дефекта.

3.5. Процедура обучения нейронной сети для диагностики дефектов

Завершающим этапом применения выбранного метода диагностирования дефектов подшипников является обучение интеллектуальной нейронной сети.

Два наиболее важных свойства, присущих нейронным сетям:

- это способность сети изменять свое поведение под влиянием эксперимента;
- способность сохранять эти изменения в течение некоторого времени.

В результате научного исследования для диагностирования локальных дефектов шлифованных поверхностей колец подшипников с помощью метода фрактальной размерности информационных сигналов, полученных с вихретокового датчика, была выбрана радиальная базисная нейронная сеть, широко используемая для задач аппроксимации функций. Сети радиальных базисных функций отличаются от других нейронных сетей своей универсальной аппроксимацией и более высокой скоростью обучения.

Сеть РБС – это тип нейронной сети, состоящей из двух слоев, а именно входного слоя и выходного слоя. Каждый из этих слоев имеет разные задачи.

Краткое описание сети РБС представлено следующим образом.

Обучение модели РБС завершается после того, как вычисленная ошибка достигла желаемых значений (т. е. 0,01) или количество итераций обучения (т. е. 500) уже было завершено. Выбирается сеть РБС с определенным количеством узлов (т. е. 10) в ее скрытом слое. В качестве передаточной функции в вычислительных единицах используется функция Гаусса. В зависимости от случая обычно наблюдается, что сети РБС требуется меньше времени для достижения конца обучения по сравнению с другими.

Основными преимуществами интеллектуальных нейронных сетей типа РБС - являются короткая фаза обучения и пониженная чувствительность к порядку представления обучающих данных. Однако во многих случаях можно обнаружить, что гладкое отображение достигается только в том случае, если

количество радиальных базисных функций, необходимых для охвата входного пространства, становится очень большим.

Сеть РБС имеет только один скрытый слой, а количество базисных функций и их форма являются проблемно-ориентированными и могут быть определены в режиме реального времени в процессе обучения. Число нейронов во входном слое равно размерности вектора признаков. Аналогично, количество узлов в выходном слое соответствует количеству классов.

Алгоритм обучения ИНС:

1. Формируется входная обучающая выборка, представленная в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Входная обучающая выборка

0.8390	0.8803	0.9546	0.8901	0.9311	0.9496	0.8861	0.9956	0.8675	0.8754	0.8732	0.9482	0.8013	0.7899	0.9634	0.8199
0.8428	0.8750	0.9636	0.8705	0.9601	0.8958	0.9252	0.9926	0.8178	0.8778	0.8317	0.9353	0.7772	0.8351	0.8752	0.7979
0.8334	0.8789	0.9294	0.8599	0.9320	0.8806	0.9336	0.9770	0.7425	0.7673	0.7737	0.8985	0.7740	0.7519	0.8865	0.8534
0.8536	0.9130	0.9231	0.8876	0.9032	0.8728	0.9238	0.9547	0.9248	0.7658	0.7629	0.8801	0.7957	0.7311	0.8747	0.8668
0.8449	0.9314	0.9092	0.9319	0.8424	0.8895	0.9080	0.9306	0.8706	0.7309	0.7599	0.8500	0.8097	0.7008	0.8701	0.9208
0.8297	0.9164	0.9028	0.9284	0.7202	0.8978	0.9104	0.9251	0.8279	0.7908	0.7727	0.8395	0.8270	0.7279	0.8742	0.8813
0.8465	0.8800	0.9111	0.9174	0.7982	0.8693	0.9178	0.9363	0.8827	0.8163	0.7168	0.7954	0.8321	0.7642	0.8806	0.8417
0.8295	0.8925	0.9119	0.9306	0.7255	0.8809	0.9186	0.9395	0.8918	0.7945	0.7313	0.7866	0.7929	0.7948	0.8675	0.8540
0.8303	0.8564	0.9203	0.9262	0.7797	0.8781	0.9328	0.9408	0.9388	0.7893	0.7334	0.7669	0.8706	0.7683	0.8820	0.8725
0.9355	0.8438	0.8941	0.9161	0.7993	0.9691	0.9368	0.9436	0.9495	0.7893	0.7406	0.7913	0.8522	0.8015	0.8926	0.9340
0.8405	0.9312	0.9211	0.9098	0.7975	0.8533	0.9312	0.9406	0.9467	0.7996	0.7078	0.7686	0.8722	0.8092	0.8937	0.8827
0.8247	0.9505	0.9146	0.9043	0.8173	0.8305	0.9443	0.9384	0.9407	0.7572	0.7341	0.8043	0.8223	0.7183	0.8663	0.8601
0.8004	0.9399	0.9315	0.9007	0.8140	0.8539	0.9362	0.9314	0.9427	0.8185	0.7425	0.8233	0.8297	0.7408	0.8501	0.8300
0.8071	0.9243	0.9404	0.8938	0.8060	0.8173	0.9278	0.9364	0.9463	0.7498	0.7432	0.8274	0.8171	0.7981	0.8691	0.8592
0.8029	0.9073	0.8991	0.9037	0.8089	0.8067	0.9256	0.9398	0.9408	0.7315	0.7361	0.8282	0.9052	0.7803	0.8615	0.8363
0.7899	0.8867	0.8895	0.9134	0.7833	0.8056	0.8896	0.9347	0.9345	0.7858	0.7476	0.8585	0.8384	0.7341	0.8214	0.8212
0.8027	0.8230	0.9020	0.9093	0.7464	0.8113	0.8870	0.9501	0.9191	0.7920	0.6990	0.8349	0.8382	0.7521	0.8617	0.7868
0.8035	0.9164	0.9062	0.9159	0.7520	0.8289	0.9237	0.9385	0.9129	0.7686	0.7369	0.8482	0.8159	0.7734	0.8773	0.7986
0.7910	0.8778	0.8983	0.9120	0.7733	0.8472	0.9181	0.9278	0.9090	0.8244	0.7422	0.8584	0.8439	0.7583	0.8522	0.8432
0.7510	0.8632	0.8803	0.9126	0.7556	0.8555	0.9006	0.8901	0.9213	0.7846	0.7420	0.8267	0.8237	0.8007	0.8416	0.8028
0.8144	0.9469	0.8750	0.9084	0.7813	0.8578	0.8924	0.8852	0.9330	0.7907	0.7999	0.8376	0.8161	0.7702	0.8408	0.8267
0.8260	0.9030	0.8789	0.8828	0.7781	0.8477	0.8935	0.9204	0.9359	0.7600	0.7434	0.8231	0.8190	0.8250	0.8445	0.8507
0.8039	0.9071	0.9130	0.9192	0.8011	0.8650	0.8887	0.9370	0.9365	0.7528	0.7259	0.8153	0.8489	0.7820	0.8431	0.8509
0.8417	0.9257	0.9314	0.9027	0.8247	0.8288	0.8821	0.9391	0.9360	0.7238	0.8155	0.8035	0.8749	0.8741	0.8517	0.8641

2. Формируется выходная обучающая выборка, представленная в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Выходная обучающая выборка

№	Название дефекта	Номер неисправности
1	Шлифовальная трещина	1
2	Кольцевой прижог	2
3	Кузнечная заштамповка НА	3
4	Ментальная трещина	4
5	Кузнечная заштамповка ТОР	5
6	Металлургическая трещина	6
7	Натир ТОР	7
8	Натир ТОР 2	8
9	Натир ТОР 3	9
10	Пятнистый прижог ДБ1	10
11	Пятнистый прижог ДБ2	11
12	Пятнистый прижог РД	12
13	Срез	13
14	Трооститное пятно ДБ	14
15	Трооститное пятно РД	15
16	Штриховой прижог	16

3. Осуществляется графическое отображение таблиц 3.2 и 3.3.

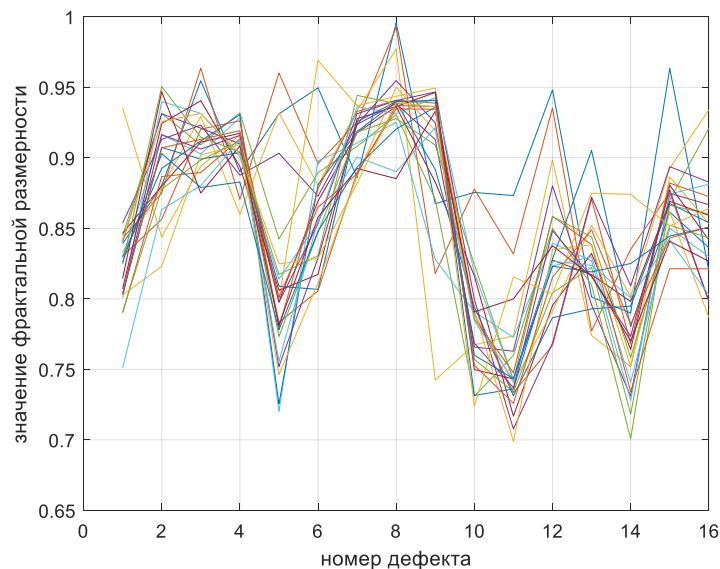


Рисунок 3.16 – Зависимость значений фрактальной размерности от вида неисправности

4. Задается структура радиальной базисной сети

На рисунке 3.17 показана структура радиальной базисной сети, выполненной в программе, представленной в Приложении Б.

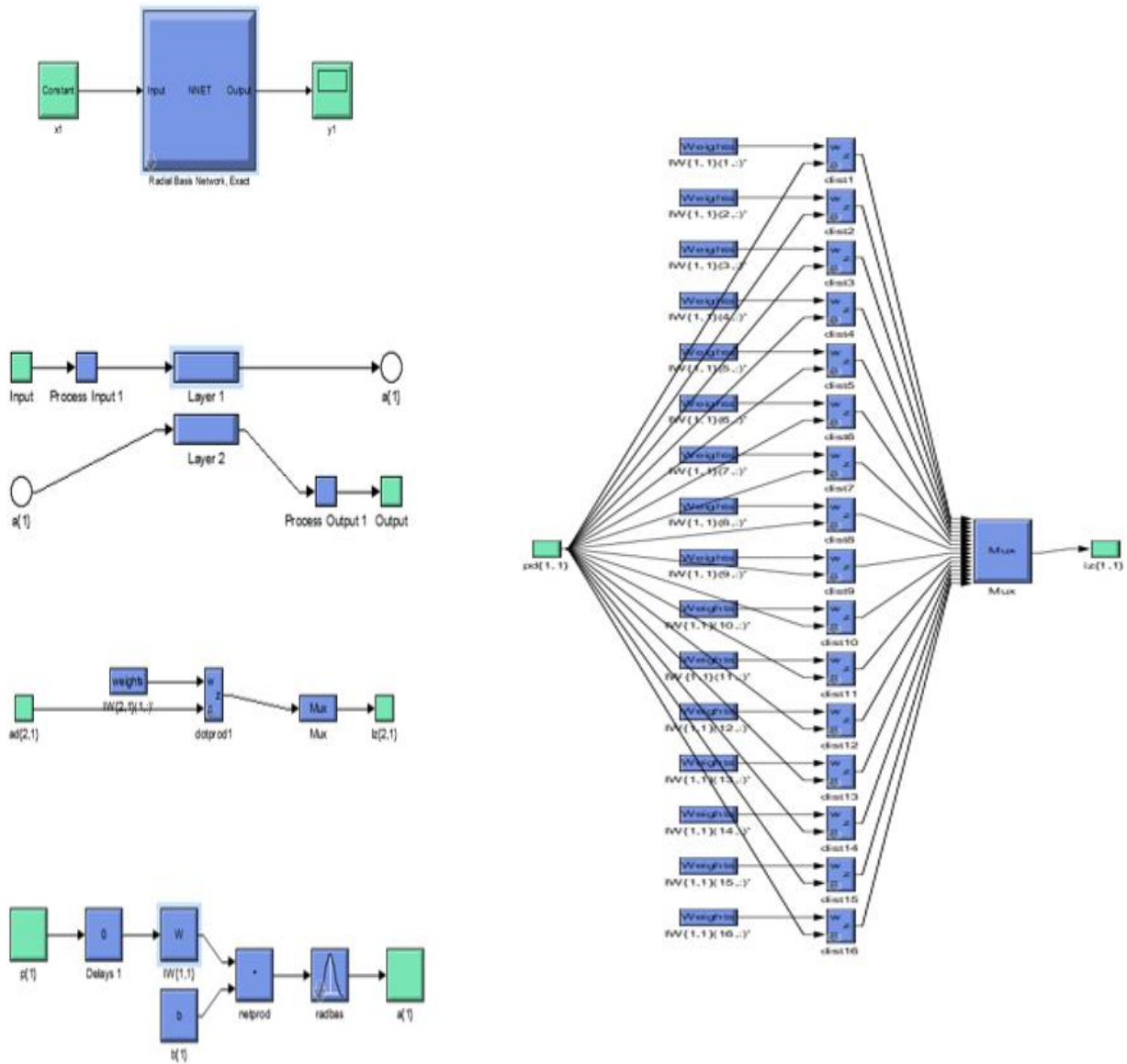


Рисунок 3.17 – Структура радиальной базисной сети

На рисунке 3.18 показан результат обучения по различным видам дефектов

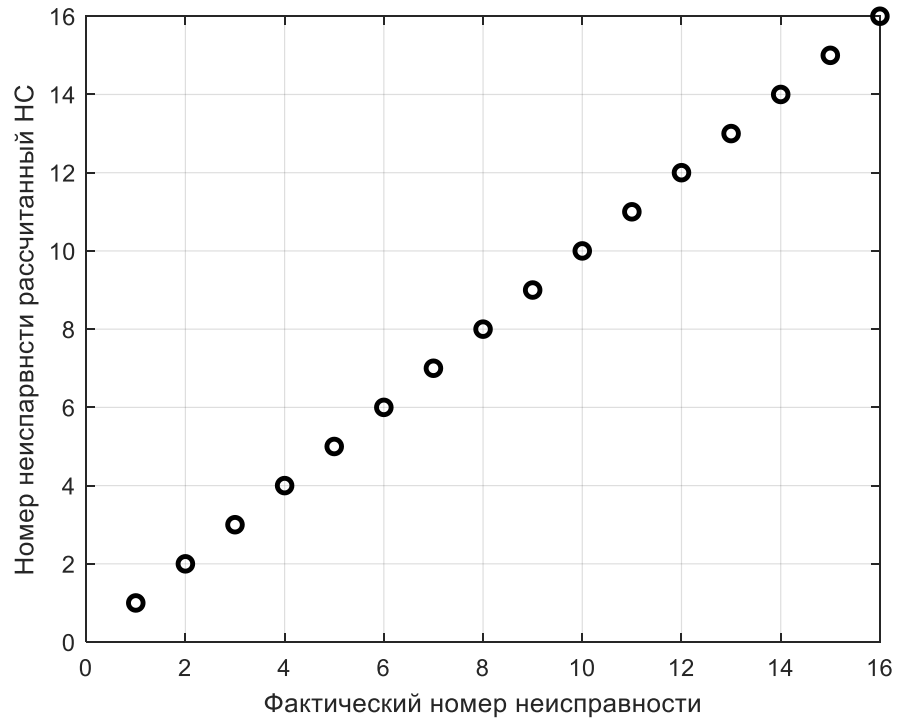


Рисунок 3.18 – Результат обучения НС

На рисунке 3.19 показана абсолютная ошибка вычисления номера неисправности

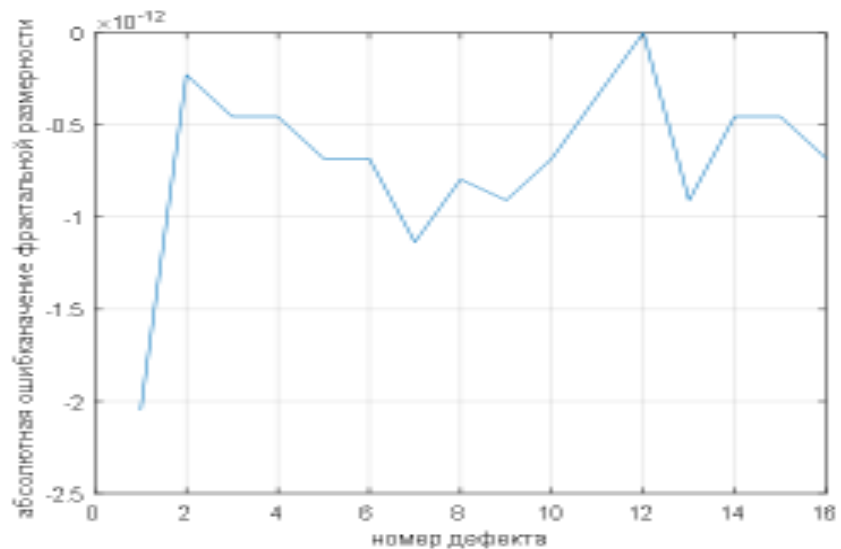


Рисунок 3.19 – Абсолютная ошибка вычисления номера неисправности

При автоматизированном вихретоковом контроле применение фрактальных размерностей информационных сигналов позволяет осуществить

распознавание основных дефектов в шлифованном поверхностном слое, что обеспечивает принятие решения для формирования заданного качества колец, повышает эффективность изготовления деталей и в целом подшипников.

3.6. Выводы

1. Проведена адаптивная фильтрация экспериментальных данных полученных при вихретоковом контроле для основных локальных дефектов с использованием SVD - разложения матриц тока и фазы сканируемой поверхности с последующим приближением этих матриц матрицами меньшего ранга в соответствии с методом главных компонент.

2. С использованием трехэлементной схемы замещения вихретокового датчика построен профиль сканируемой поверхности подшипника, позволяющий оценить её шероховатость.

3. Проведён расчет фрактальной размерности локальных дефектов, позволивший установить информативность фрактальной размерности и её хорошую корреляцию с локальными дефектами.

4. Получена входная обучающая выборка, состоящая из матриц фрактальных размерностей сканируемой поверхности и выходная обучающая выборка, состоящая из условных номеров локальных дефектов.

5. Была выбрана структура нейронной сети, а именно – радиальная базисная сеть, и проведено её обучение по сформированным обучающим выборкам.

6. Установлена принципиальная возможность обнаружения дефектов при вихретоковом контроле шлифованных поверхностей дорожек подшипников путем предварительного отображения внешнего вида шлифованной поверхности, расчета её фрактальной размерности и последующей диагностики дефектов по фрактальным размерностям предварительно обученной радиальной базисной нейронной сетью.

ГЛАВА 4. ИНЖИНИРИНГ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ

4.1 Технические средства вихретокового контроля

В настоящее время на качество выпускаемой продукции и эффективность всего производства влияют множество факторов, таких как состояние используемого оборудования, организация контроля всех параметров и т.д.

Для обеспечения всего технологического процесса необходимо установить контроль за оборудованием и его состоянием, а также установить их взаимосвязь с качеством выпускаемой продукции.

Для контроля выпускаемой продукции на предприятиях необходимо устанавливать измерительные системы, обладающие высоким быстродействием, а также для снижения влияния человека. Системы должны быть автоматическими или автоматизированными. Для работы с таким оборудованием необходимы специалисты, которые способны управлять такими системами. Для обработки данных, а также принятия решений в вопросах, возникающих в ходе всего технологического процесса, предприятие нуждается в программном обеспечении, отвечающем заданным требованиям.

В настоящее время можно производить измерения параметров ТП различными способами, производить наладку оборудования, осуществлять выбор сырья, тем самым повышать эффективность самой технологии производства. Предприятия стремятся оснастить производство новым технологическим оборудованием, внедрить современные системы контроля качества и мощные вычислительные системы для более точного соблюдения необходимых параметров.

По результатам контроля и на основании знаний и опыта полученных в результате долгой работы специалиста принимается решение об изменениях параметров технологического процесса [36].

На предприятии АО «ЕПК Саратов» (ранее ОАО «СПЗ») используется вихретоковый метод контроля, который помогает распознавать неоднородности, возникающие при производстве подшипников. Прибор ПВК-К2М вырабатывает сигнал, который имеет фазовую и амплитудную составляющие [36].



Рисунок 4.1 – Автоматизированный прибор вихретокового контроля ПВК-К2М

Конструктивно ПВК-К2М состоит из:

- трехкоординатного сканера, имеющего специализированное программное управление,
- вихретокового преобразователя,
- компьютера,
- устройства сопряжения компьютера со сканером и вихретоковым

преобразователем.

Визуализация дефекта поверхности подшипника в виде неоднородности появляется на мониторе компьютера в виде сканограммы, содержащей саму поверхность, на которой можно определить визуально наличие дефекта, а также графики информационных сигналов (ток, фаза).

Преимуществом данного прибора является наличие цифрового измерителя, встроенного в систему, который позволяет определить значение сигнала в любой точке подшипника.

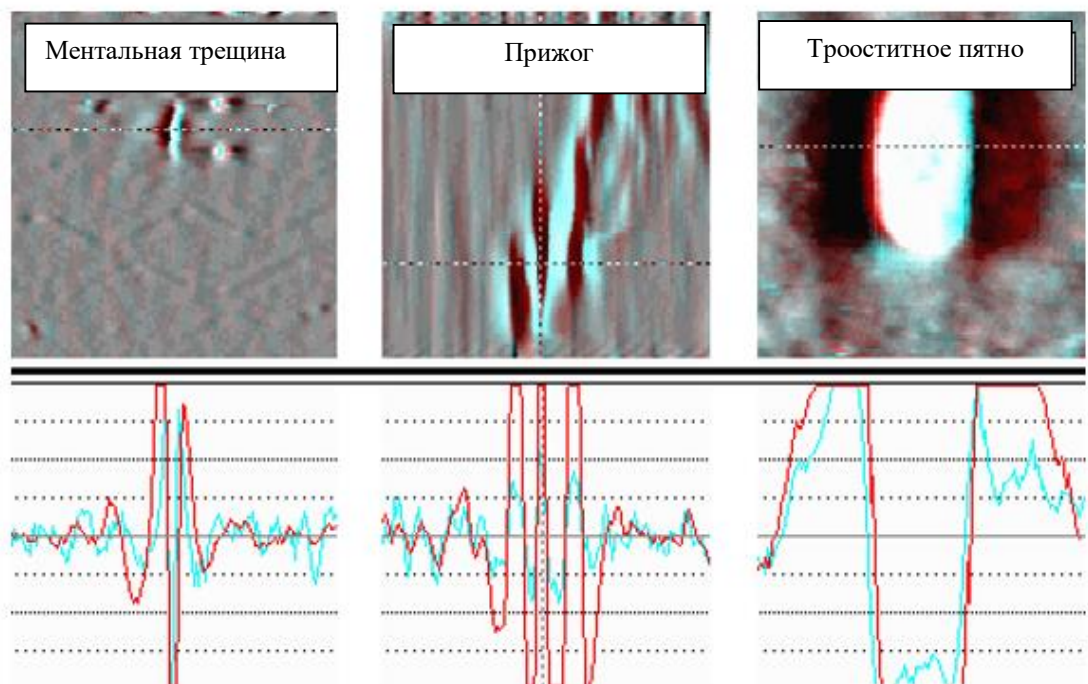


Рисунок 4.2 – Участки сканограмм и примеры форм сигналов локализованных дефектов

Принцип работы ПВК-К2М заключается в том, что деталь закрепляют на вращающемся с постоянной угловой скоростью столе, далее датчик сканирует вращающееся кольцо по образующей и проходит вдоль всей высоты вращающейся в горизонтальной плоскости детали. При этом структура поверхностного слоя детали влияет на получаемые данные: чем однороднее структура поверхностного слоя детали, тем однороднее данные, полученные от датчика. Стоит отметить, что идеального изделия быть не может, а даже на

самых «лучших» изображениях наблюдаются некоторые неравномерности [69].

Объединение приборов ПВК-К2М в сеть и подключение их к единому хранилищу данных позволяют создать базу данных контроля деталей подшипников, применять статистические и иные методы обработки данных с целью улучшения технологического процесса. [31-33]

Основные технические характеристики прибора представлены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики прибора

№	Технические характеристики	Значения
1	Диапазон измерений осевого положения дефекта, мм	0+140
2	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения осевого положения точечного дефекта, мм	+0,5
3	Диапазон измерений углового положения дефекта, градус	360
4	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения углового положения точечного дефекта, градус	10
5	Отношение сигнал-шум в начале дефекта - первый канал - второй канал	5-2 15-3
6	Диапазон регулирования чувствительности к глубине дефекта, деление/мкм	0,3-3
7	Пределы допускаемой основной относительной погрешности чувствительности к глубине дефекта, %	+30

8	Диапазон скоростей вращения контролируемой детали, об/с	0-2
9	Диапазон шага сканирования, мм/об	0,05-0,8
10	Наработка на отказ не менее, ч	10000
11	Напряжение питания, В	220
12	Потребляемая мощность, Вт	500
13	Срок службы не менее, лет	8
14	Габаритные размеры, мм - сканирующего устройства - блока управления - компьютера	350x570x850 450x450x300 600x1000x500
15	Масса, кг	110

Результаты диссертационного исследования использованы при совершенствовании алгоритмического и программного обеспечения приборов ПВК-К2М на АО «ЕПК Саратов» (ранее ОАО «СПЗ»).

Апробированы следующие алгоритмы программный модуль:

- алгоритм формирования 3D-поверхности деталей качения подшипников по сигналам вихретокового датчика позволяющий оценить шероховатость шлифованной поверхности.
- алгоритм диагностирования дефектов поверхностей деталей подшипников с использованием фрактального анализа и нейронных сетей.
- специализированный программный модуль, выполненный в SCADA – системе TRACE MODE[58].

Эффективность внедрения результатов диссертационной работы обеспечивается повышением достоверности выявления дефектов колец при вихретоковом контроле и отбраковке колец, что способствует значительному повышению выпуска подшипников высокого качества.

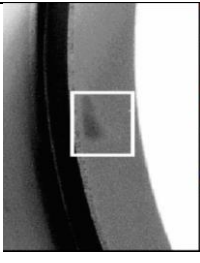
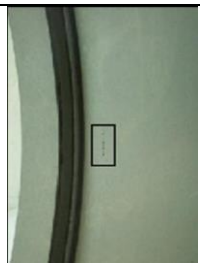
4.2. Программные средства системы вихретокового контроля

Прибор ПВК-К2М оснащен сканером который может определить дефекты возникающие на поверхности кольца подшипника.

В таблице 4.2 представлены основные виды дефектов, возникающие на поверхности подшипников, которые прибор ПВК-К2М может определить.

Таблица 4.2 – Основные виды дефектов

№	Название дефекта	Вид дефекта
1	Натир ТОРЗ	
2	Кузнечная заштамповка	
3	Шлифовальная трещина	
4	Трооститное пятно	
5	Срез	

6	Пятнистый прижог			
7	Ментальная трещина			

Любая точка сканограммы, указанная курсором, выводится в виде цифровой индикации координат и уровня сигнала вихретокового преобразователя.

В данном приборе непосредственное измерение параметров длины и ширины идентифицированных неоднородностей в поверхностном слое формируется программным обеспечением при автоматическом вычислении расстояния между любыми двумя точками сканограммы, указанными курсором. Степень и глубину изменений металлического поверхностного слоя коррелируют с сигналом ВТП.

Избирательное изменение чувствительности стенда к неоднородностям металлического слоя обеспечивается программной обработкой данных, полученных от ВТП. Если рассматривать, например, нерабочие поверхности кольца, то сигналы о недопустимых дефектах в виде мелких трещин в структуре материала не игнорируются на общем фоне допускаемых пятен структурной неоднородности. Для выполнения этого условия осуществляется полосовая частотная фильтрация всплесков. Область с выявленной неоднородностью считается та область, уровень сигнала ВТП в которой двукратно превышает среднее квадратическое отклонение сигнала от проверяемой поверхности детали. В настройки прибора предварительно заносятся пределы допускаемой величины сигналов по полосам с учетом требований к однородности структуры

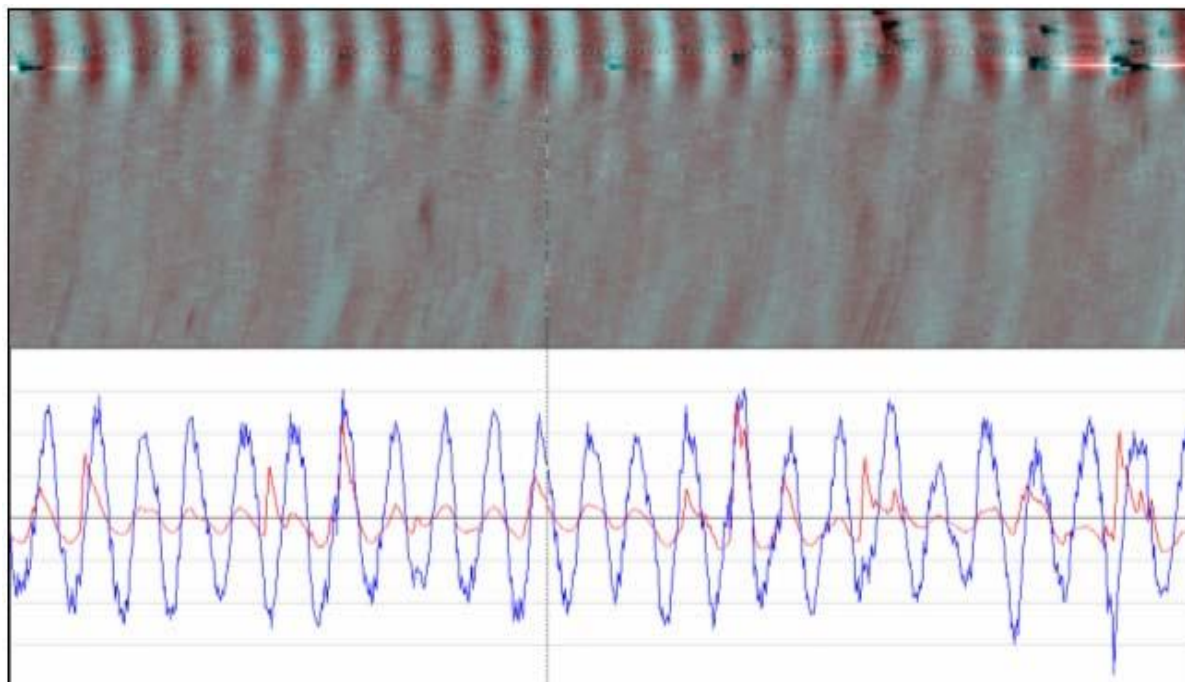


Рисунок 4.4 – Сигналы, полученные с прибора контроля

Для того чтобы сократить время диагностирования дефектов возникающих при производстве подшипников предлагается внедрить программу по распознаванию локальных дефектов в виде систем диспетчерского контроля и сбора данных.

4.3. Реализация алгоритма распознавания локальных дефектов с использованием современной SCADA-системы

Для эффективной реализации системы контроля на предприятиях целесообразно внедрить программу по распознаванию локальных дефектов в виде систем диспетчерского контроля и сбора данных, такие системы имеют важное значение для широкого спектра отраслей промышленности и широко используются для контроля и мониторинга процесса. Целесообразно использовать систему контроля, выполненную в современной SCADA-системе.

Системы SCADA широко используются, поскольку они имеют возможность контролировать процесс, а также передавать данные в режиме реального времени.

Термин SCADA означает систему диспетчерского управления и сбора данных. Она используется для управления широким спектром оборудования и нескольких серверов в отраслях SCADA и средах SCADA. Одна система SCADA может использовать несколько различных протоколов связи.

Обычно системы SCADA используются для автоматизации сложных процессов, в которых человеческий контроль нецелесообразен. SCADA используется в различных отраслях промышленности, в том числе для обеспечения круглосуточного мониторинга без перерыва. Кадровая логистика и затраты могут быстро создать ценность для внедрения базовых систем управления SCADA.

Современные системы SCADA также могут принести пользу промышленным процессам, в которых существует множество факторов управления. Тщательное построение наборов правил может помочь системным операторам выполнять рутинные функции управления. Автоматизированная система будет обрабатывать данные и отправлять команды. Системы, использующие программное обеспечение человеко-машинного интерфейса, позволяют сосредоточиться на принятии решений на основе данных в реальном времени.

В современном мире предприятия стремятся автоматизировать каждый этап производства и принимать более разумные решения за счет правильного использования данных, и системы SCADA [151] являются отличным способом достижения этой цели.

Для реализации алгоритма, рассмотренного в главе 3, была разработана программа в среде SCADA TRACE MODE и получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017611861 от 14.12.2016, которая обладает рядом функциональных преимуществ таких как:

- обмен данными в реальном времени;
- управление производственным процессом локально или удаленно;
- формирование удобного интерфейса в работе;

- наличие встроенной базы данных, которая информирует о ходе всех технологических операций предприятия;
- современная аварийная система;
- формирование отчетов, графиков, диаграмм, для наглядного отображения информации о состоянии предприятия.

Разработанная программа в SCADA TRACE MODE представляет собой личный кабинет пользователя, расположенный в доменной зоне, доступ в личный кабинет осуществляется с помощью логина и пароля. В зависимости от роли и прав доступа, пользователь может создавать, редактировать или просматривать информацию о состоянии производства.

Руководство оператора состоит из двух разделов. В первом разделе представлена информация для пользователя с правом доступа «Администратор», во втором разделе представлена информация для пользователя с правами доступа «Оператор».

Назначение и область применения.

Разработанное программное обеспечение предназначено для мониторинга состояния процесса, формирования отчетов и проведения анализа брака на выделенных участках (цехах).

Описание функций программы.

Функциональные возможности разработанной программы по диагностированию дефектов позволяют обрабатывать информацию по различным параметрам, которые помогут персоналу выявить недостатки работы предприятия в целом.

К таким параметрам можно отнести:

- дату и время, а также интервал работы,
- номер цеха,
- номер прибора,
- балл,
- номер станка,
- обрабатываемую деталь,

- проводимые операции,
- оператора, работающего в данное время,
- смену.

На рисунке 4.5 представлена схема взаимодействия системы контроля с пакетом прикладных программ.

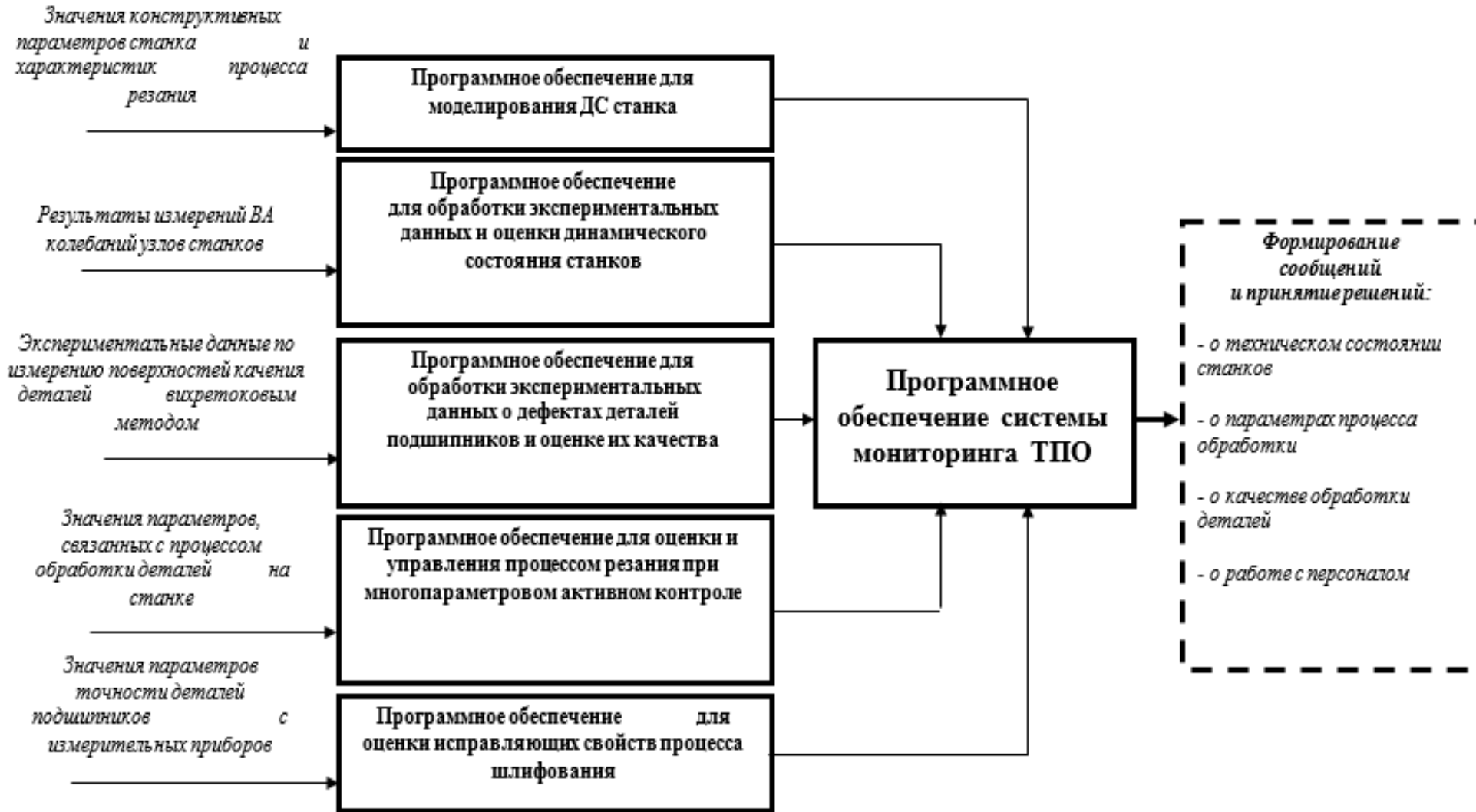


Рисунок 4.5 – Схема взаимодействия системы контроля

В программе по распознаванию дефектов осуществляется подсчет статистики, в которой отображается необходимая информация, содержащая полученные результаты и параметры отбора данных. Также можно осуществить формирование итогового отчета по полученным данным.

Для демонстрации полученных отчетов в форме, удобной для специалистов разного уровня, существует возможность формирования графиков и диаграмм: круговые диаграммы, столбчатые диаграммы, а также графики эффективности производства в течение заданного промежутка времени.

Интерфейс программы:

Программа по распознаванию дефектов в режиме реального времени имеет удобный интерфейс, который состоит из нескольких областей, содержащих информацию по различным параметрам, необходимым для успешной работы предприятия.

1. Определение дефекта в режиме реального времени.
2. Запросы различного характера.
3. База данных
4. Отчеты
5. Статистика.

В основе работы программы лежит метод распознавания дефектов: определение фрактальной размерности информационных сигналов.

При активации программы необходимо произвести нажатие тумблера.

На рисунке 4.6 представлено окно запуска программы, т.е происходит начало считывания информационных сигналов с вихретокового датчика в режиме реального времени.

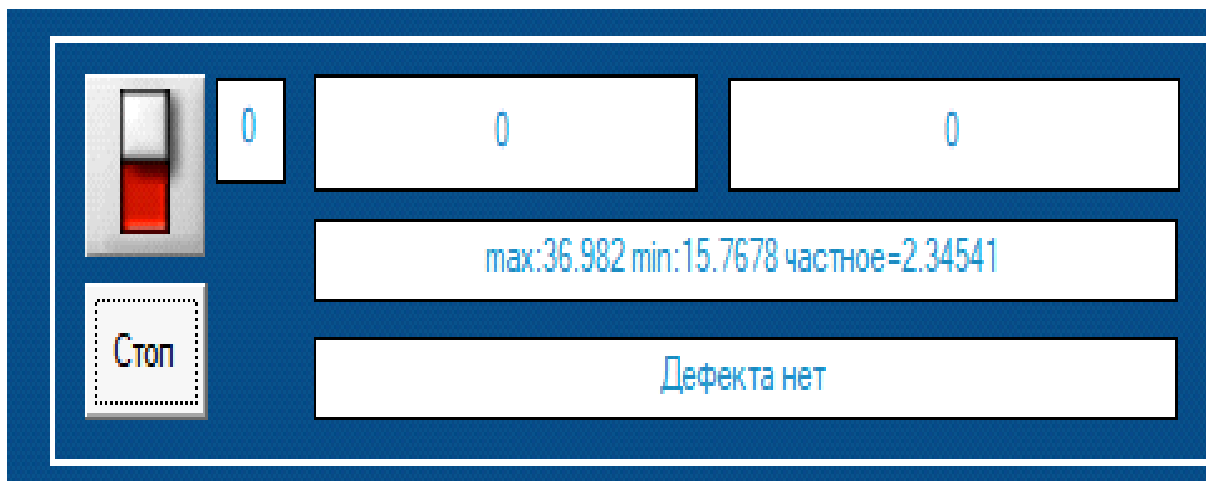


Рисунок 4.6 – Окно активации считывания значений информационных сигналов в режиме реального времени

В данном окне реализуется алгоритм программы диагностирования:

1. Ввод полученных данных с вихретокового датчика в виде массивов данных информационных сигналов токов и фазы.
2. Выделение дефектной области.
3. Диагностирование типа дефекта.

Информация о состоянии диагностирования записывается в БД в режиме реального времени.

На рисунке 4.7 представлена ER-диаграмма БД, которая наглядно демонстрирует какая информация будет записываться и обрабатываться.

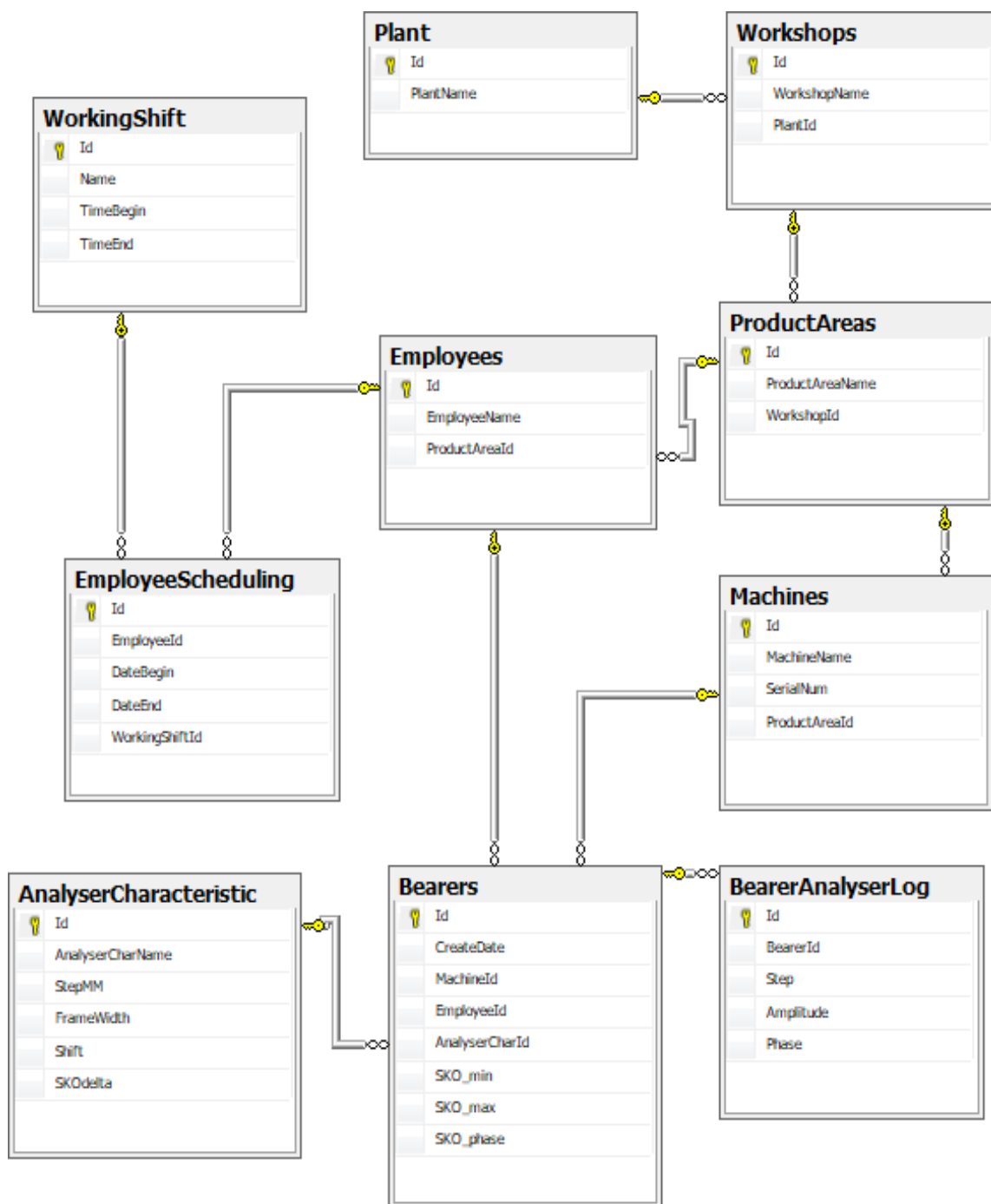


Рисунок 4.7 – ER-диаграмма

В программе по распознаванию дефектов можно формировать запросы различного рода для выполнения необходимых задач.

На рисунке 4.8 представлено окно запросов по различным параметрам, которые помогают персоналу сформировать данные по необходимым показателям.

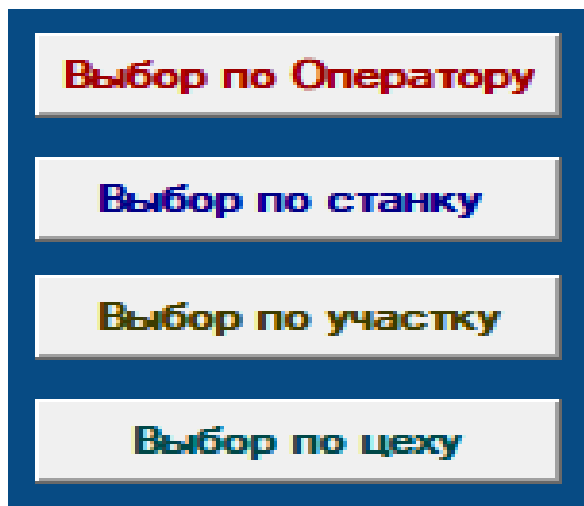


Рисунок 4.8 – Окно запросов

С помощью рассматриваемой системы контроля можно производить выборку по дате, за определенный период работы, что позволит определять бракованные подшипники и выявить причину их возникновения, для предотвращения таких ситуаций в будущем.

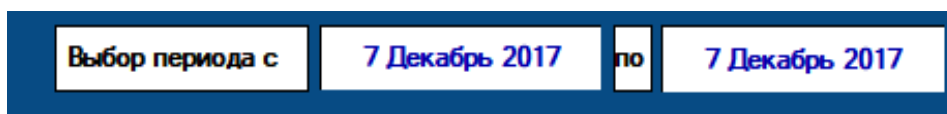


Рисунок 4.9 – Определение даты

Результат запроса представлен на рисунке 4.10 в виде таблицы, что позволяет наглядно находить нужную информацию персоналу, и делать соответствующие выводы по работе предприятия и решать проблемы, возникающие при работе.

Выборка дефектных подшипников

Запись Готово

b [id]	[createdate]	[jko_min]	[jko_max]	[jko_phase]	m.machinename	e.employeeame	pa.productareaname	ws.workshopname	p.plantname	ac.analyserchname
162	2017-06-19 20:49:48	0.412269516227377	1.2739128051426	1.20412217453681	Станок_1_1	Сотрудник_1_1	Участок_1_1	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
168	2017-06-19 21:01:48	0.410308543158475	1.26785339835969	1.21668809726598	Станок_1_1	Сотрудник_1_1	Участок_1_1	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
171	2017-06-19 21:07:48	0.401261219838538	1.23989716930108	1.36515269020265	Станок_1_2	Сотрудник_1_1	Участок_1_1	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
175	2017-06-19 21:15:48	0.408606570339246	1.26259430234827	1.12954924001478	Станок_1_2	Сотрудник_1_1	Участок_1_1	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
191	2017-06-19 21:47:48	0.417548121594792	1.29022369572791	1.28345455242972	Станок_1_2	Сотрудник_1_2	Участок_1_1	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
196	2017-06-19 21:57:48	0.419853927702277	1.29734863660004	1.10727897550746	Станок_1_2	Сотрудник_1_2	Участок_1_1	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
31	2017-06-14 00:11:36	0.4387006559906795	1.3555850391112	1.28727042960752	Станок_1_2	Сотрудник_1_2	Участок_1_1	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
36	2017-06-14 00:21:36	0.444166710130044	1.37247513430183	1.14090676436491	Станок_1_2	Сотрудник_1_2	Участок_1_1	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
49	2017-06-14 00:47:36	0.40990800908268	1.26661574806548	1.29074363225319	Станок_2_3	Сотрудник_2_3	Участок_1_2	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
50	2017-06-14 00:49:36	0.37660689476614	1.16371530482737	1.05443721664802	Станок_2_3	Сотрудник_2_3	Участок_1_2	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
207	2017-06-19 22:19:48	0.39488839605433	1.22020515478079	1.18869554911353	Станок_2_3	Сотрудник_2_3	Участок_1_2	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
55	2017-06-14 00:59:36	0.309662258490914	0.937491714011162	1.21435879453365	Станок_2_4	Сотрудник_2_3	Участок_1_2	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
59	2017-06-14 01:07:36	0.415627400885551	1.28428866873635	1.19205113178022	Станок_2_4	Сотрудник_2_3	Участок_1_2	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
62	2017-06-14 01:13:36	0.433304516246398	1.33891095520137	1.0790440429776	Станок_2_3	Сотрудник_2_4	Участок_1_2	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
73	2017-06-14 01:35:36	0.320045183420922	0.97697424711303	1.03770266573306	Станок_2_4	Сотрудник_2_4	Участок_1_2	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
74	2017-06-14 01:37:36	0.375163058271636	1.15925385005936	1.04855786241199	Станок_2_4	Сотрудник_2_4	Участок_1_2	Цех_1_1	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
247	2017-06-19 23:39:48	0.313837279862507	0.970491806013472	1.04219371059799	Станок_3_5	Сотрудник_3_5	Участок_2_1	Цех_1_2	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
94	2017-06-14 02:17:36	0.447765459126492	1.38360144870086	1.23970183410574	Станок_3_6	Сотрудник_3_5	Участок_2_1	Цех_1_2	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
97	2017-06-14 02:23:36	0.395998870179829	1.22363650889567	0.945362894247459	Станок_3_6	Сотрудник_3_5	Участок_2_1	Цех_1_2	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
110	2017-06-14 02:49:36	0.41222106335318	1.27376308576175	1.16210175212156	Станок_3_5	Сотрудник_3_6	Участок_2_1	Цех_1_2	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
266	2017-06-20 00:17:48	0.397103087413379	1.22704854010734	1.37530431591456	Станок_3_5	Сотрудник_3_6	Участок_2_1	Цех_1_2	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
270	2017-06-20 00:25:48	0.434924828814325	1.34391772103626	1.09854169326514	Станок_3_5	Сотрудник_3_6	Участок_2_1	Цех_1_2	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
115	2017-06-14 02:59:36	0.408237284435604	0.988308607735464	0.98802001080331	Станок_3_6	Сотрудник_3_6	Участок_2_1	Цех_1_2	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
129	2017-06-14 03:27:36	0.408237284435604	1.26145320890602	1.23549898992262	Станок_4_7	Сотрудник_4_7	Участок_2_2	Цех_1_2	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
282	2017-06-20 00:49:48	0.466976298254632	1.44295676160681	1.16801696046598	Станок_4_7	Сотрудник_4_7	Участок_2_2	Цех_1_2	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50
293	2017-06-20 01:11:48	0.291558339690066	0.959287883786259	1.12830491547349	Станок_4_8	Сотрудник_4_7	Участок_2_2	Цех_1_2	Завод_1	Точность 5мм, окно 20, сдвиг 50

Рисунок 4.10 – Результат запроса в программе диагностирования

Одним из главных преимуществ разработанной программы распознавания дефектов является не только оперативная обработка большого объема полученной информации о технологическом процессе и оборудовании, но и генерация отчетной документации как в электронной форме, так и в виде твердых копий для практического использования (рисунок 4.11-4.12).

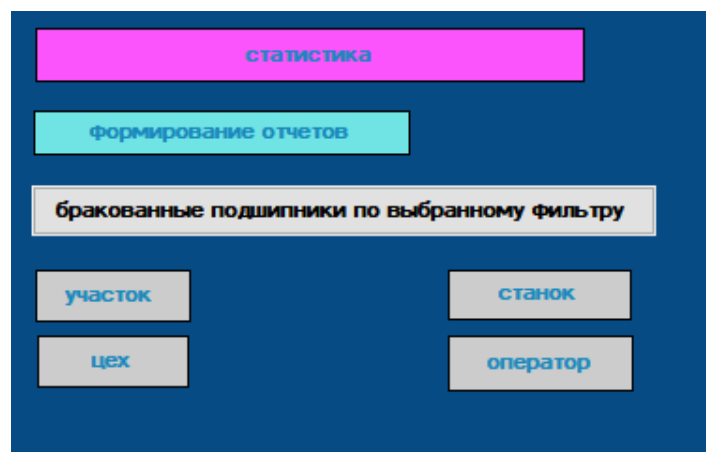


Рисунок 4.11 – Статистика



Рисунок 4.12 – Область диаграмм

Структура таких отчетов полно отражает действительность работы всего предприятия по нужным показателям, для своевременных действий, связанных с заменой сырья или замены оборудования. Эффективность работы такой системы контроля приводит к значительной экономии времени и денег.

4.4. Оценка эффективности системы вихретокового контроля

На предприятии АО «ЕПК-Саратов» разработан и внедрен классификатор КЗ-2005 неоднородности дефектов поверхностного слоя деталей подшипников, выявляемых с помощью вихретокового контроля. С его помощью производится обучение персонала предприятия, который на основе сканограммы детали принимает решение о качестве поверхностного слоя, наличии и типе дефекта, которые используются в дальнейшем для формирования базы данных. Данный способ не является однозначным и трудоёмким, так как присутствует «человеческий фактор», влияют такие факторы, как квалификация специалиста, что обуславливает необходимость внедрения таких современных средств автоматизации [46].

Для реализации канала вихретокового контроля в составе технической подсистемы необходимо научно-методическое обеспечение, позволяющее определить методы и средства для эффективного решения задачи

автоматизированного выявления дефектов поверхностного слоя деталей подшипников. Это способствует принятию решения о корректировке ТП в случае его разладки, т.е. канал обеспечивает обратную связь в системе мониторинга технологического процесса, встроенную в систему менеджмента качества продукции (МКП) предприятия.

Решение проблем, возникающих при производстве подшипников представлены на рисунке 4.12:

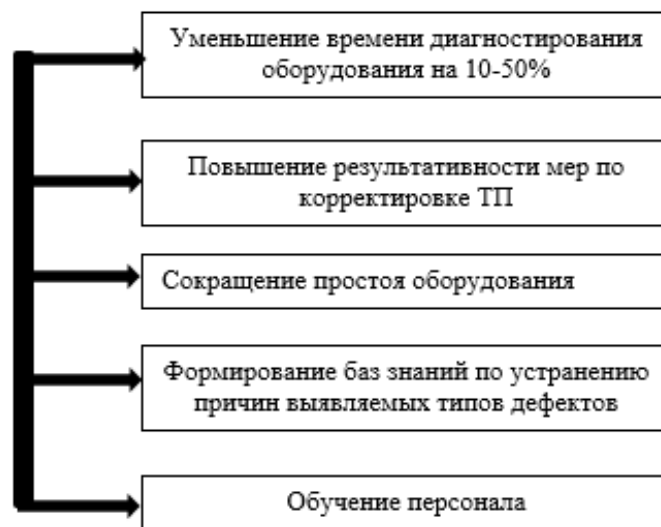


Рисунок 4.12 – Решение проблем после внедрения систем контроля в ТП

Применение фрактального анализа в системах контроля позволило увеличить достоверность распознавания дефектов за счёт повышения скорости обработки информационных сигналов, полученных с ВТП.

Практическая апробация метода выполнена в два этапа: во-первых, проведен обучающий эксперимент на контрольной партии колец с известными дефектами, во-вторых, проведено распознавание дефектов колец, полученных непосредственно со станков после шлифования дорожки качения.

В таблице 4.3 представлены результаты первого этапа - применение системы контроля для контрольных колец с известными дефектами. Фактически

это является обучающим экспериментом. Дефекты установлены известными методами, ранее использовавшимися в подшипниковой промышленности (травление поверхностей, получение шлифов и другие металлографические методы).

Таблица 4.3 – Результаты распознавания дефектов колец в обучающих выборках

	Вид дефекта	Верно распознанные дефекты, %	Кол-во деталей, с дефектами, шт.
1	Шлифовальная трещина	100	25
2	Кольцевой прижог	100	7
3	Кузнечная заштамповка НА	100	23
4	Метальная трещина	100	14
5	Кузнечная заштамповка ТОР	100	10
6	Металлургическая трещина	100	9
7	Натир ТОР	100	10
8	Натир ТОР 2	100	13
9	Натир ТОР 3	100	14
10	Пятнистый прижог ДБ1	100	5
11	Пятнистый прижог ДБ2	100	12
12	Пятнистый прижог РД	100	11
13	Срез	100	21
14	Трооститное пятно ДБ	100	22
15	Трооститное пятно РД	100	8
16	Штриховой прижог	100	23

Результаты обучающего эксперимента показали, что предложенный метод обработки вихретоковых сигналов обеспечивает высокий уровень выявления дефектов.

Практическая реализация второго этапа – апробация алгоритмов автоматизированного метода контроля качества, основанного на определении фрактальной размерности вихретоковых информационных сигналов, проводилась в АО "ЕПК-Саратов", причем кольца для выборочного контроля отбирались сразу

после операции шлифования дорожек качения. Полученные результаты представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты применения разработанного программного обеспечения при распознавании дефектов изготовленных колец

№	Характеристики эффективности	После внедрения
1	Уменьшение брака при производстве колец	Снижение на 20% за счет отбраковки колец
2	Достоверность распознавания дефектов непосредственно после шлифования	80%

Из таблицы видно, что применение разработанного метода распознавания дефектов с использованием фрактального анализа свидетельствует о высоком соответствии поставленной цели исследования: повышение достоверности распознавания дефектов и совершенствование автоматизированных средств контроля качества и развития АСУ ТП предприятия.

По полученным результатам систему контроля колец подшипников можно рассматривать как эффективную обратную связь в системе мониторинга технологического процесса. По результатам мониторинга осуществляется не только отбраковка колец, но и изменение значений параметров режимов шлифования, а также ремонтно-профилактические мероприятия на станках. Только при комплексном применении всех мер можно добиться высокой производительности и эффективности всего процесса производства.

4.5 Выводы

В результате проведенных исследований, представленных в данной главе, можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрены основные дефекты подшипников и причины их возникновения, позволившие сформулировать методические требования к проектируемой SCADA-системе.

2. Приведены краткие характеристики технических и программных средств, позволившие сформулировать технические и программные требования к проектируемой SCADA – системе.

3. Выполнено проектирование SCADA – системы вихретокового контроля, что позволило повысить эффективность контроля.

4. Проведена оценка эффективности системы вихретокового контроля, показавшая уменьшение брака при производстве на 20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных в работе исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Проведен анализ методов неразрушающего контроля шлифованных деталей подшипников, установлена необходимость повышения достоверности выявления дефектов в поверхностном слое дорожек качения колец подшипников путем совершенствования вихретокового метода и совершенствования алгоритмов обработки информационных сигналов.

2. Проведена регистрация и адаптивная фильтрация экспериментальных данных системы вихретокового контроля и произведено формирование обучающих выборок для проведения фрактального анализа и обучения интеллектуальной нейронных сетей

3. Созданы 3D -поверхности деталей качения подшипников по сигналам с вихретокового датчика, на основе которых осуществляется интегральная оценка качества поверхности.

4. Разработано методическое обеспечение и усовершенствовано алгоритмическое обеспечение для автоматического распознавания локальных дефектов на основе фрактального анализа полученных 3D -поверхностей и вычисление их фрактальной размерности шлифованных поверхностей с последующей обработкой этих размерностей нейронной сетью, что позволяет получить интегральную оценку качества поверхностей и существенно повысить достоверность диагностики дефектов.

5. Сформирована радиальная базисная сеть и проведено её обучение, позволившее обеспечить высокую достоверность диагностирования дефектов по фрактальному анализу.

6. Разработана система автоматизированного контроля локальных дефектов поверхностей качения колец подшипников в отечественной среде SCADA TRACE MODE с удобным интерфейсом, который позволяет осуществлять в режиме реального времени определение дефектов по фрактальной

размерности информационных сигналов, что повышает достоверность распознавания основных дефектов при производстве приводящего к снижению брака на 20%.

7. Специализированный программный модуль внедрен в автоматическую вихретоковую систему в АО «ЕПК Саратов», занимающегося разработкой приборов вихретокового контроля для подшипниковой промышленности. Применение такой программы позволяет повысить качество контроля выпускаемых изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов С. В., Маланин В. П. Сравнительный анализ схем замещения первичных вихретоковых преобразователей // Приборы. 2015. № 9. С. 20-27.
2. Александров Ф. И., Голяндина Н. Э. Автоматизация выделения трендовых и периодических составляющих временного ряда в рамках метода «Гусеница»-SSA // Exponenta Pro: Математика в приложениях. 2004. № 3-4. С. 54-61.
3. Алгоритм определения износа резца при токарной обработке по запасу устойчивости динамической системы / Вахидова К.Л., Минцаев М.Ш., Исаева М.Р., Игнатъев М.А., Игнатъев С.А. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 3. С. 56-63.
4. Алгоритм распознавания основных дефектов поверхностей колец подшипников с применением метода фрактальной размерности и нейронных сетей / Вахидова К.Л., Минцаев М.Ш., Исаева М.Р., Пашаев В.В. // Инженерный вестник Дона, № 3. 2022. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7499
5. Алешин Н. П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Н. П. Алешин. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2019. 576 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/151068> (дата обращения: 20.08.2022).
6. Амос Г. MATLAB. Теория и практика [Электронный ресурс] / пер. с англ. Н. К. Смоленцева. – М.: ДМК Пресс, 2016. 416 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/82814> (дата обращения 7.03.2019).
7. Архипов А. В. Проверка и калибровка средств неразрушающего контроля [Электронный ресурс] / под ред. А. В. Архипова. – М.: АСМС, 2019. 224 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/167321> (дата обращения: 20.08.2022).
8. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: Основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145-1170.

9. Аринчин С. А., Кузнецов В. Б. К расчету спектров сигналов в вихретоковой дефектоскопии // Методы и прибор автоматического неразрушающего контроля. Электромагнитные методы: сб. тр. Рига: РТИ, 1978. Вып. 2. С. 84-92.
10. Бобков А. В. Системы распознавания образов [Электронный ресурс]: учеб. пособие. Москва: МГТУ им. Баумана, 2018. 187 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/172815> (дата обращения: 20.08.2022)
11. Бобров А. Л., Власов К. В., Бехер С. А. Основы вихретокового неразрушающего контроля: учеб. пособие // Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2019. 98 с.
12. Бахтеев А. Р. Совершенствование контроля качества деталей подшипников вихретоковым методом на основе автоматизации распознавания дефектов поверхностей качения с использованием искусственных нейронных сетей: автореф. дисс. канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2007. 16 с.
13. Вахидова К. Л., Игнатъев С.А. Применение SCADA-системы в программе «Мониторинг» // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2016. С. 51-54.
14. Вахидова К. Л., Шухин В.В. Внедрение системы мониторинга качества продукции на предприятиях по производству подшипников // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2017. С. 145-147.
15. Вахидова К. Л. Экспертная система на основе SCADA Trace Mode, как составляющая системы мониторинга // Фундаментальные и прикладные исследования проблемы и результаты. Грозный, 2017. С. 128-131.
16. Вахидова К. Л., Игнатъев А.А. Вихретоковый контроль деталей подшипников в системе мониторинга технологического процесса // Автоматизация и управление в машино и приборостроении : сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2018. С. 16-19.
17. Вахидова К. Л., Игнатъев А. А., Игнатъев С. А. Программа оценки и принятия решения по качеству поверхности кольца подшипника // Современные

технологии в атомной энергетике: сб. тр. III Всероссийской научно-практической конференции. Балаково, 2017. Т. 2. С. 21-24.

18. Вахидова К. Л. Реализация программы диагностирования и принятие решения по качеству поверхности кольца подшипника SCADA Trace Mode // Перспективы развития топливно-энергетического комплекса и современное состояние нефтегазового инженерного образования в России: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Грозный: ГГНТУ, 2018. С. 303-307.

19. Вахидова К. Л. Диагностирование основных дефектов возникающих на поверхности колец подшипников по фрактальной размерности / К. Л. Вахидова // Миллионщиков-2019: материалы II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова. – Грозный: ГГНТУ, 2019. С. 144-148.

20. Вахидова К. Л. Внедрение специализированного программного обеспечения для автоматизированного распознавания дефектов в АСУТП // Яндаровские чтения: сборник научных материалов Всероссийского научно-практического семинара, посвященного 100-летию ГГНТУ. Грозный, 2020. С. 40-44.

21. Вахидова К. Л., Садулаев А. А-В., Абдуллаев С.С. Внедрение систем контроля для автоматизированного распознавания дефектов возникающих при производстве подшипников // Автотранспортный комплекс 3.0. Актуальные проблемы и перспективы развития: материалы международной научно-практической конференции. Грозный: ГГНТУ, 2023. С. 110-114.

22. Волков А. В. Автоматизация контроля и испытаний газоразрядных ламп на основе статистического анализа временных рядов, нейронных сетей и SCADA-технологий: дис. канд. техн. наук. Пенза: ПГУ, 2019. 266 с.

23. Галушкин А. И. Теория нейронных сетей: учеб. пособие для вузов / под общ. ред. А. И. Галушкина. М.: ИПРЖР, 2000. Кн. 1. 416 с.

24. Волынская О. В. Автоматизация вихретокового контроля неоднородности структуры поверхностного слоя деталей подшипников при мониторинге процесса шлифования: автореф. дисс. канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2002. 16 с.

25. Воробьев В. И., Грибунин В. Г. Теория и практика вейвлетпреобразования. СПб.: ВУС, 1999. 204 с.

26. Гаврилов А. Н., Барметов Ю. П., Хвостов А. А., Теория автоматического управления технологическими объектами (линейные системы) [Электронный ресурс]: учеб. пособие. Воронеж : ВГУИТ, 2016. 243 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/76258> (дата обращения 20.08.2022)

27. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2001. 384 с.

28. Герасимов В. Г., Кулаев В. Г. Электромагнитное поле вихретокового преобразователя в присутствии изделия произвольной формы // Методы и приборы автоматического неразрушающего контроля. Электромагнитные методы: сб. науч. тр. Рига: РТИ, 1977. Вып. 1. С. 5-11.

29. Гетьман А. А. Оценка надежности технологического процесса изготовления литых деталей [Электронный ресурс]: монография. СПб : Лань, 2020. 192 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/143244> (дата обращения: 20.08.2022)

30. Голяндина Н. Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 76 с.

31. Горбунов В. В., Игнатьев С. А., Виноградов М. В., Карпеев М. В. Управление режимами шлифования в системе мониторинга производства подшипников // Динамика технологических систем: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2004. С. 68-72.

32. Горбунов В. В., Игнатьев А. А., Волынская О. В. Статистическое распознавание неоднородностей шлифовальных поверхностей при вихретоковом методе контроля // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2002. С. 43-46.

33. Горбунов В. В., Чечнев А. С., Игнатъев А. А. Управление технологическим процессом производства подшипников на основе мониторинга технологического оборудования // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2003. С. 77-80.

34. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2004. 261 с.

35. Горкунов Э. С., Макаров А. В., Коган Л. Х. Магнитные и электромагнитные методы контроля износостойкости стальных изделий // Контроль. Диагностика. 2001. № 11. С. 13-15.

36. Дворников С. В., Сауков А. М. Метод распознавания радиосигналов на основе вейвлет-пакетов // Научное приборостроение. 2004. Т. 14. № 1. С. 85-93.

37. Дворников С. В., Желнин С. Р., Медведев М. В. Метод формирования признаков распознавания сигналов диапазона декаметровых волн, по их вейвлеткоэффициентам, рассчитанным на основе лифтинговой схемы. Информация и космос. 2006. № 2. С. 68-73.

38. Добровольский И. Г. Повышение достоверности вихретокового контроля при выявлении участков с повышенной твердостью в зонах припайки стеллитовых пластин на кромках лопаток турбин // Контроль. Диагностика. – 2001. № 9. С. 22-24.

39. Дремин И. М. Иванов О. В., Нечитайло В. А. Вейвлеты и их применение // УФН. 2001. Т. 171. № 5. С.465-501.

40. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.

41. Дьяконов, В. П. MATLAB R2007/2008/2009 для радиоинженеров: учеб. пособие [Электронный ресурс]. М.: ДМК-Пресс, 2010. 976 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/1180> (дата обращения 7.05.2021).

42. Запускалов В. Г., Маслов А. И. Вихретоковый контроль новый числительный комплекс слежения за параметрами свариваемого стыка магистральных трубопроводов // Контроль. Диагностика. 2001. № 5. С. 3-6.

43. Затонский А. В., Тугашова Л. Г. Моделирование объектов управления в MatLab [Электронный ресурс]: учеб. Пособие. СПб.: Лань, 2019. 144 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/111915> (дата обращения 7.03.2021).

44. Значение комплексного управления качеством для предприятий машиностроительной отрасли / Вахидова К.Л., Игнатъев С.А., Исаева М.Р., Хакимов З.Л., Шухин В.В. // Инженерный вестник Дона, № 2. 2018. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4977. С. 91.

45. Зубарев Ю. М., Юрьев В. Г. Абразивные инструменты. Разработка операций шлифования [Электронный ресурс]: учеб. пособие. СПб: Лань, 2022. 360 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/213188> (дата обращения: 20.08.2022)

46. Игнатъев А. А., Горбунов В. В., Горбунова О. В. Автоматизированная вихретоковая дефектоскопия деталей подшипников // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2000. С. 48-52.

47. Игнатъев А. А., Чистяков А. М., Горбунов В. В., Автоматизированная вихретоковая дефектоскопия деталей подшипников // СТИН. 2002. № 4. С. 17-19.

48. Игнатъев А. А., Бахтеев А. Р. Автоматизация распознавания дефектов шлифованных деталей в системе мониторинга технологического процесса производства подшипников // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 3 (14). С. 136-142.

49. Игнатъев А. А., Горбунов В. В., Волынская О. В. Организация мониторинга процесса шлифования деталей подшипников с применением автоматизированного вихретокового контроля // Высокие технологии в машиностроении: сб. науч. тр. Самара, 2002. С. 112-115.

50. Игнатъев А. А., Горбунов В. В., Игнатъев С. А. Организация управления качеством шлифования на основе активного контроля с несколькими информационными параметрами // Исследования станков и инструментов для обработки сложных и точных поверхностей: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2000. С. 121-125.

51. Игнатьев А. А., Самойлова Е. М., Игнатьев С. А. Интеллектуализация мониторинга технологического процесса производства деталей точного машиностроения. Саратов: СГТУ, 2013. 119 с.

52. Игнатьев А. А., Горбунов В. В., Игнатьев С. А. Активный контроль и мониторинг процесса шлифования деталей подшипников. Саратов: СГТУ, 2007. 104 с.

53. Игнатьев С. А. Обеспечение качества обработки поверхностей качения колец подшипников на основе контроля динамического состояния шлифовальных станков по стохастическим характеристикам виброакустических колебаний. Саратов: СГТУ, 2009. 36 с.

54. Игнатьев С. А., Добряков В. А., Игнатьев А. А., Автоматизированный контроль динамических характеристик станков как один из элементов системы мониторинга технологического процесса Вестник Саратовского государственного технического университета. 2004. № 1 (2). С. 99-107.

55. Игнатьев С. А., Нестерова И. В., Игнатьев А. А. Методическое обеспечение автоматизированной оценки динамического состояния шлифовальных станков в системе мониторинга для корректировки технологического процесса // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 1 (11). С. 90-96.

56. Игнатьев С. А. Применение вейвлет-преобразований при автоматизированном контроле качества колец подшипников // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2008. С. 97-101.

57. Игнатьев С. А. Теоретическое обоснование мониторинга процесса шлифования в подшипниковом производстве на основе многопараметрового контроля качества // Студенты, аспиранты и молодые ученые – малому наукоемкому бизнесу (Ползуновские гранты): материалы Всерос. конф. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2006. С. 30-40.

58. Интегрированные системы проектирования и управления. SCADA [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Х. Н. Музипов, О. Н. Кузяков, С. А. Хохрин

и др.– СПб : Лань, 2022. 408 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/213209> (дата обращения: 20.08.2022)

59. Кангин В. В., Кангин М. В., Ямолдинов Д. Н. Разработка SCADA систем [Электронный ресурс]: учеб. пособие. Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 564 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/124674> (дата обращения: 20.08.2022).

60. Карпеев М. В., Пчелинцев А. С., Игнатъев С. А. Автоматизированный вихретоковый контроль роликов подшипников как элемент технологического производства // Прогрессивные направления развития технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2010. С. 125-128.

61. Карасев В. В. Автоматизированные информационно-управляющие системы [Электронный ресурс]: учеб. пособие. Рязань: РГРТУ, 2013. 64 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/168010> (дата обращения: 20.08.2022).

62. Клюев В. В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник: в 2 кн. Кн. 2. М.: Машиностроение, 1986. 352 с.

63. Колентьев С. В. Сравнительный анализ частотной и частотновременной фильтрации данных // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2002. С. 99-102.

64. Контроль в системах автоматизации технологических процессов / А. А. Игнатъев, М. В. Виноградов, В. А. Добряков и др. Саратов: СГТУ, 2001. 124 с.

65. Кривоносова Е. А. Применение теории фракталов в металловедении: монография. СПб.: Лань, 2020. 196 с.

66. Крюков А. С. Исследование и разработка методов анализа данных при вихретоковом контроле цилиндрических изделий многоэлементными преобразователями: автореф. дис. канд. техн. наук. Москва: НИУ МЭИ, 2016. 25с.

67. Латыпова Н. В. Фрактальный анализ: учеб. пособие. Ижевск: Изд. центр «Удмуртский университет», 2020. 120 с.

68. Лавриненко В. Ю., Чернов В. В., Сережкин М. А. Моделирование технологических процессов восстановления деталей в машиностроении

[Электронный ресурс] : учеб. пособие. М.: МГТУ им. Баумана, 2019. 98 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/172745> (дата обращения: 20.08.2022)

69. Леликов О. П. Подшипники качения [Электронный ресурс]: справочник. М.: Инновационное машиностроение, 2017. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/175271> (дата обращения 7.03.2021)

70. Лихолетова Н. В., Кубарь М. А. Система контроллинга в управлении деятельностью предприятия [Электронный ресурс]: монография. Персиановский : Донской ГАУ, 2020. 212 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/148540> (дата обращения: 20.08.2022).

71. Ложковский А.Г. Упрощенный расчет коэффициента херста методом R/S-анализа // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. 2017. № 1. 34 с.

72. Люгер Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. 864 с.

73. Макаров И. М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006. 333 с.

74. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Ин-т компьютерных исследований, 2002. 656 с.

75. Мониторинг станков и процессов шлифования в подшипниковом производстве: монография / А.А. Игнатъев, В.В. Горбунов, В.А. Добряков, М.В. Виноградов, С.А. Игнатъев Саратов: СГТУ, 2004. 124 с.

76. Мониторинг станков и процессов шлифования в подшипниковом производстве / А. А. Игнатъев, М. В. Виноградов, С. А. Игнатъев и др. Саратов: СГТУ, 2004. 124 с.

77. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием. М.: Машиностроение, 1975. 304 с.

78. Неразрушающие методы контроля и механические испытания сварных соединений [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А. Н. Гончаров, В. В. Неверов, П. Н. Клевцов, С. В. Лебедев. Липецк : Липецкий ГТУ, 2021. 114 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/216086> (дата обращения: 20.08.2022).

79. Околов А. Р., Дрозд А. В, Гутич И. И. Системы автоматизированного контроля [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие. Минск: БНТУ, 2018. 55 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/248525> (дата обращения: 20.08.2022).

80. Определение качества поверхностей качения колец подшипников по результатам вихретокового контроля / К. Л. Вахидова, С. В. Абрамов, О. В. Ермилина, А. Д. Семенов // Автоматизация в промышленности, № 8. 2022. С. 51-53.

81. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. // Пер. с польского И.Д. Рудинского. - М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.

82. Поршнева С. В., Рабайа. Ф. Исследование особенностей применения метода сингулярного спектрального анализа в задаче анализа и прогнозирования временных рядов: монография. Ульяновск: Зебра, 2016. 167 с.

83. Пуш А. В. Моделирование и мониторинг станков и станочных систем // СТИН. 2000. № 9. С. 12-20.

84. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации. М.: Логос, 2002. 664 с.

85. Потапов А.А., Гильмутдинов А.Х., Ушаков П.А. Системные принципы и элементная база фрактальной радиоэлектроники. ч. II. методы синтеза, модели и перспективы применения // Радиотехника и электроника. 2008. № 11 (53). С. 1347-1394.

86. Применение искусственных нейронных сетей в материаловедении: учеб. пособие / А. Г. Тягунов, О. Б. Мильдер, Д. А. Тарасов, А. П. Сергеев. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021. – 68 с.

87. Пролубников А. В. Математические методы распознавания образов [Электронный ресурс]: учеб. пособие. Омск : ОмГУ, 2020. 110 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/142454> (дата обращения: 20.08.2022).

88. Пчелинцев А. С., Игнатъев А. А. Автоматическое распознавание дефектов деталей подшипников на основе интегральных оценок вейвлет-коэффициентов с использованием интеллектуальных технологий // Вестник

Саратовского государственного технического университета. 2010. № 3 (48). С. 102-108.

89. Пчелинцев А. С. Вейвлет-преобразование и анализ временных рядов в подшипниковой промышленности на основе вихретокового контроля // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2008. С. 187-190.

90. Пчелинцев А. С. Влияние дискретных данных на результат вейвлетанализа в подшипниковом производстве // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2009. С. 152-155.

91. Пчелинцев А. С. Автоматическое распознавание дефектов деталей подшипников при вихретоковом контроле на основе интегральной оценки спектров вейвлет-коэффициентов информационных сигналов: автореф. дис. канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2010. 19 с.

92. Пчелинцев Д. О. Автоматизация распознавания локальных дефектов поверхностного слоя колец подшипников с применением вейвлет-преобразований при вихретоковом контроле в системе мониторинга: автореф. дис. канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2009. 16 с.

93. Пчелинцев Д. О., Игнатьев С. А. Метод автоматического распознавания дефектов деталей подшипников на основе вихретоковой дефектоскопии с помощью вейвлет-преобразования // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. № 3 (40). С. 70-77.

94. Пчелинцев Д. О. Методы обработки сигнала с вихретокового преобразователя // Молодые ученые науке и производству: материалы конф. Саратов: СГТУ, 2008. С. 184-187.

95. Пчелинцев Д. О., Игнатьев С. А., Игнатьев А. А. Методика автоматизированного выявления локальных особенностей сигналов, представленных временными рядами // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2008. С. 95-97.

96. Пчелинцев Д. О., Игнатьев С. А., Игнатьев А. А. Контроль качества

колец подшипников вихретоковым методом с применением вейвлетпреобразований // Исследование сложных технологических систем: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2008. С. 57-60.

97. Пчелинцев Д. О., Игнатьев С. А., Методика автоматизации распознавания локальных дефектов деталей подшипников // Исследования сложных технологических систем: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2009. С. 159-161.

98. Пчелинцев Д. О. Локализация следа дефекта поверхности детали подшипника в вихретоковом сигнале с помощью вейвлет-преобразований // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2009. С. 225-230.

99. Пьявченко Т. А. Автоматизированные информационно-управляющие системы с применением SCADA-системы TRACE MODE [Электронный ресурс]: учеб. пособие. СПб: Лань, 2022. 336 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/212153> (дата обращения: 20.08.2022).

100. Распознавание дефектов поверхностного слоя подшипников с применением метода фрактальной размерности / Вахидова К.Л., Игнатьев А.А., Исаева М.Р, Хакимов З.Л., Шухин В.В. // Инженерный вестник Дона, №1. 2019 ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5664

101. Распознавание дефектов поверхностей качения колец подшипников по фрактальной размерности сигналов вихретокового датчика / К. Л. Вахидова, А. А. Игнатьев, С. К. Сперанский, С. А. Игнатьев // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении.: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2019. С. 52-54.

102. Ревинская, О. Г. Символьные вычисления в MatLab [Электронный ресурс]: учеб. пособие. Томск: ТГУ, 2018. 528 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/112827> (дата обращения 7.05.2021).

103. Романов П. С., Романова И. П. Системы искусственного интеллекта. Моделирование нейронных сетей в системе MATLAB [Электронный ресурс]: лабораторный практикум. 2-е изд., стер. СПб: Лань, 2022. 140 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/202172> (дата обращения: 20.08.2022).

104. Ростовцев В. С. Искусственные нейронные сети [Электронный ресурс]: учеб. для вузов. 2-е изд., стер. СПб: Лань, 2021. 216 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/160142> (дата обращения: 20.08.2022).

105. Руннова А. Е. Вейвлеты в геофизике: обработка сигналов в сейсморазведке: монография. М: Университетская книга, 2013. 190 с.

106. Сапожников А. Б. Теоретические основы электромагнитной дефектоскопии металлических тел. Т. 1 / под редакцией В. С. Семенова. Томск: Издательство Томского университета, 1980. 307 с.

107. Семенов А. Д., Юрков Н. К. Моделирование систем управления [Электронный ресурс]: учеб. для вузов. СПб : Лань, 2022. 328 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/197543> (дата обращения: 20.08.2022)

108. Семенов А. Д., Маланин В. П. Определение информативных параметров вихретоковых датчиков с использованием настраиваемых // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 4 (10). С. 53-58.

109. Сидоров В. А., Сотников В. А. Эксплуатация подшипников качения. М.: Спутник+, 2013. 196 с.

110. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2005. 304 с.

111. Стадник А. В. Использование искусственных нейронных сетей и вейвлет-анализа для повышения эффективности в задачах распознавания и классификации: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. Иваново: Иван. гос. ун-т, 2004. 24 с.

112. Тупицын А. Н. Распознавание сигналов и анализ нестационарных точечных процессов с использованием вейвлет-преобразований: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2009. 38 с.

113. Управление качеством продукции. Международные стандарты ИСО 9000–9004, ИСО 8402. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 120 с.

114. Федоров М. М. Использование нейросетевых методов для решения задач идентификации объектов [Электронный ресурс] // Современные научные

исследования и инновации. 2013. № 9. Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2013/09/26285> (дата обращения: 07.03.2021).

115. Федосенко Ю. К., Шкатов П. Н., Ефимов А. Г. Вихретоковый контроль: учебное пособие для подготовки специалистов по неразрушающему контролю и технической диагностике / под общ. ред. акад. РАН В. В. Клюева. М.: Спектр, 2011. 223 с.

116. Фомин Я. А. Распознавание образов: теория и применения. 2-е изд., доп. М.: Фазис, 2012. 432 с.

117. Фомин М. В. Расчеты опор с подшипниками качения [Электронный ресурс]: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 53 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/172785> (дата обращения: 20.08.2022).

118. Цуриков А. Н. Моделирование и обучение искусственных нейронных сетей [Электронный ресурс]: учеб. пособие. Ростов-н/Д.: РГУПС, 112 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/140610> (дата обращения: 20.08.2022).

119. Чуи К. Введение в вейвлеты. М.: Мир, 2001. 412 с.

120. Шихеева В. В. Фрактальная геометрия. Детерминированные фракталы [Электронный ресурс]: учеб. Москва : МИСИС, 2019. 270 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/129074> (дата обращения: 20.08.2022).

121. Шелухин О. И., Осин А. В., Смольский С. М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения [Электронный ресурс]: учеб. пособие. М.: Физматлит, 2008. 368 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2307> (дата обращения: 20.08.2022)

122. Щербаков М. А., Ремонтов А. П., Ремонтов Г. А. Оценка качества динамических изображений на основе вейвлет-анализа // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Спецвып. 2011. С. 54-56.

123. Шкатов П. Н., Шатеринков П. Н. Неразрушающий контроль трещин и коррозионных поражений вихретоковым методом // Контроль. Диагностика. 1998. № 2. С. 39-42.

124. Шкатов П. Н., Родюков М. С. Методы неразрушающего контроля [Электронный ресурс]: методические указания. М.: РТУ МИРЭА, 2021. 94 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/218816> (дата обращения: 20.08.2022).

125. Шумков Ю. М., Хижняк Л. В. Информационные характеристики автоматизированной системы контроля дефектов// Методы и приборы автоматического неразрушающего контроля. Электромагнитные методы: сб. науч. тр. Рига: РТИ, 1988. Вып. 11. С. 72-78.

126. Шубочкин А. Е. Развитие методов и средств вихретокового и магнитного контроля металлопроката для оценки его остаточного ресурса: дис. ... д-ра техн. наук. Москва: ЗАО Научно-исследовательский институт интроскопии московского научно-производственного объединения «СПЕКТР», 2014. 237 с.

127. Шумарова О. С. Совершенствование алгоритмического обеспечения для автоматического распознавания локальных дефектов при вихретоковом контроле колец подшипников с обоснованием вида вейвлет-преобразования информационных сигналов: дис.... канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2016. 162 с.

128. Шумихин А. Г., Бояршинова А. Г. Применение нейросетевых динамических моделей в задаче параметрической идентификации технологического объекта в составе системы управления // Вестник ПНИПУ. – Химическая технология и биотехнология. 2015. № 3. С. 21-38.

129. Addison P. S. The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science Engineering, Medicine and Finance. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2002

130. Application of the method of fractal dimension in the recognition of defects of the surface layer of bearings / K. L. Vakhidova, Z. L. Khakimov, M. R. Isaeva, V. V. Shukhin, Z. V. Sadykova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – 378 (1). – 012076.

131. Domingues M. O., Mendes J. O. F. Mendes da Costa. On wavelet techniques in atmospheric sciences // Advances in Space Research. 2005. Vol. 35.P. 831.

132. Eckart C., Young G. The approximation of one matrix by another of lower rank // *Psychometrika*. 1936. 1. pp. 211-218.
133. Eisner J. A. *Singular Spectrum Analysis. A New Tool in Time Series Analysis*. New York: Plenum Press, 1996. 163 p.
134. Falniowski, F. On the connections of generalized entropies with Shannon and Kolmogorov-Sinai entropies // *Entropy*. – 2014. – 11.
135. Fractal Complexity-based Feature Extraction Algorithm of Communication Signals / H. Wang, J. Li, L. Guo, Z. Dou, Y. Lin, R. Zhou // *Fractals*. 2017. 25. 1740008.
136. Fu, R.-R. Compound jamming signal recognition based on neural networks // *Sixth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC-2016)*, 2016. pp. 737-740.
137. Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavsky A. *Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2001. 305 p.
138. Guariglia E. Entropy and Fractal Antennas // *Entropy*. 2016. 18. P. 84.
139. Intelligent technologies in process of highly-precise products manufacturing / K.L. Vakhidova, Z.L. Khakimov, M.R. Isaeva et al. // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 87 (2017) 082052; (SCOPUS)
140. Jia, Y. U., Chen Y. Digital modulation recognition method based on BP neural network // *Transducer Microsyst. Technol.* 2012. 5. P. 7.
141. Krzysztofik W. J. Fractal Geometry in Electromagnetics Applications From Antenna to Metamaterials // *Microw. Rev.* 2013. 19. pp. 3-14.
142. Liu K., Zhang X., Chen Y. Q. Extraction of Coal and Gangue Geometric Features with Multifractal Detrending Fluctuation Analysis // *Appl. Sci.* 2018. 8. P. 463.
143. Liu S., Pan Z., Cheng X. W. Fu W. Fractal generation method based on asymptote family of generalized Mandelbrot set and its application // *J. Nonlinear Sci. Appl.* 2017. 10. pp. 1148-1161.
144. Liu S. Numeric characteristics of generalized M-set with its asymptote // *Appl. Math. Comput.* 2014. 243. pp. 767-774.

145. Shcherbakov M. A., Krot A. M. Identification of discrete input nonlinear systems for digital chaotic signal processing. Recent Advances in Information Science and Technology. Greece: World Scientific, 1998. pp. 251-253.

146. Shcherbakov M. A., Krot A. M., Tkachova P. P. Nonlinear Filtering for Solving the Problem of Variability in Speech Recognition // Proc. of the 5th German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding. Herrsching, Germany, 21-25 September, 1998. – pp. 151-157.

147. Taqqu, M. S. Benoît Mandelbrot and fractional Brownian motion // Statist. Sci. 2013. 28 (1). pp. 131-134.

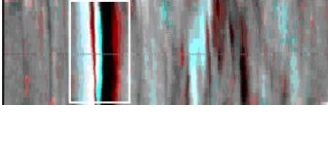
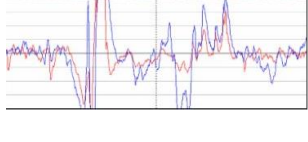
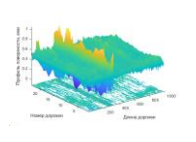
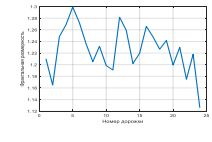
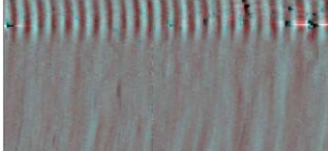
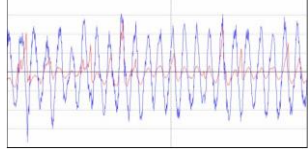
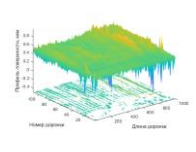
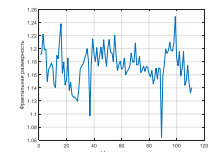
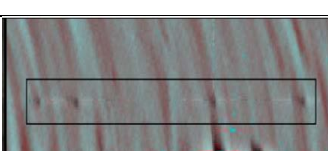
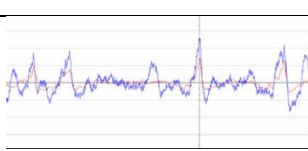
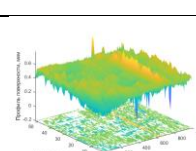
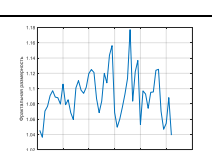


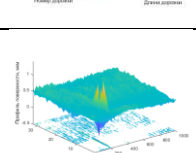
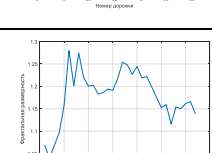
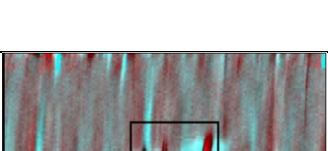

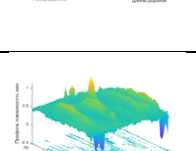
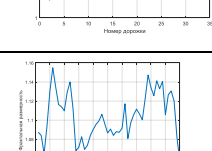
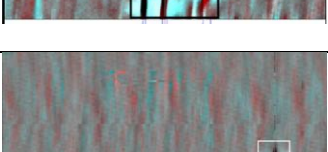

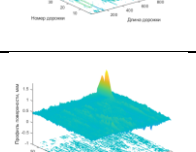
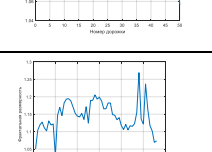

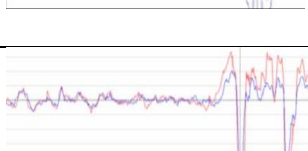
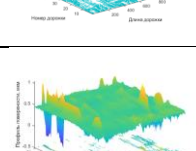
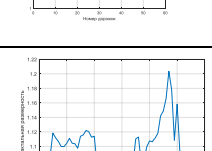


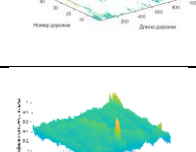
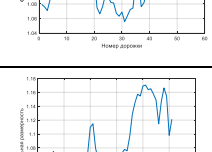
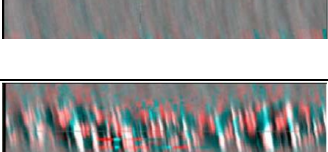

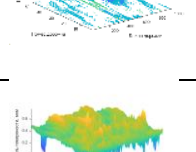
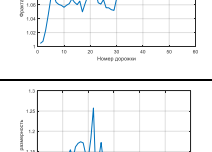
148. Wadhvani S., Gupta S. P., Kumar V. Wavelet based vibration monitoring for detection of faults in ball bearings of rotating machines // IE(I) Journal-EL. – Vol. 86. Sep. 2005. – P. 77-81.

149. URL: <http://www.ebcorp.ru>

150. URL: <http://www.micron.ru>

151. URL: <http://www.adastra.ru/>

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Экспериментальные данные

	Название дефекта	Реальный вид дефекта	Сканограмма поверхности	Профиль	Фрактальная размерность	Значение фрактальной размерности
1	Шлифовальная трещина					1.18
2	Кольцевой прижог					1.11
3	Кузнечная заштамповка НД					1.09
4	Металлическая трещина					1.1
5	Кузнечная заштамповка TOP					1,2
6	Металлургическая трещина					1,14
7	Натир TOP					1,087
8	Натир TOP 2					1,061
9	Натир TOP 3					1,06

10	Пятнистый прижог ДБ1					1,22
11	Пятнистый прижог ДБ2					1,25
12	Пятнистый прижог РД					1,16
13	Срез					1,171
14	Трооститное пятно ДБ					1,23
15	Трооститное пятно РД					1,13
16	Штриховой прижог					1,15

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Листинги программ

«Программа main.m»

```

clear
%Чтение данных
Da=xlsread('kuznech_zashtNAa.xlsx')
Df=xlsread('kuznech_zashtNAf.xlsx');
[n,m]=size(Da)
[x,y]=meshgrid(1:n,1:m);
figure (1)
surfc(x',y',Da),grid
shading interp
xlabel('Длина дорожки')
ylabel('Номер дорожки')
zlabel('Условный ток')
figure (2)
surfc(x',y',Df),grid
shading interp
xlabel('Длина дорожки')
ylabel('Номер дорожки')
zlabel('Условная фаза')
% SVD - фильтрация
Dfa=fil(Da);
Ae=Dfa;
figure (3)
surfc(x',y',Dfa),grid
shading interp
xlabel('Длина дорожки')
ylabel('Номер дорожки')
zlabel('Условный ток (фильтрация)')
Dff=fil(Df);
Fe=Dff;
figure (4)
surfc(x',y',Dff),grid
shading interp
xlabel('Длина дорожки')
ylabel('Номер дорожки')
zlabel('Условная фаза (фильтрация)')
% Нормирование амплитуды и фазы
load ms % Чтение данных из файла ms
Ar=(Ae-mean(Ae))*sa./std(Ae)+ma;
figure (5)
surfc(x',y',10*Ar),grid
shading interp
xlabel('Длина дорожки')
ylabel('Номер дорожки')
zlabel('Нормированный ток, A')
Fr=(Fe-mean(Fe))*sf./std(Fe)+mf;
figure (6)
surfc(x',y',Fr),grid
shading interp
xlabel('Длина дорожки')
ylabel('Номер дорожки')
zlabel('Нормированная фаза, рад')

```

```

% Расчет профиля поверхности
Rr=0.67./(Ar-I0);%
Sr=real(log((Rr-Rd)/Rn))*kr;
figure (7)
surfc(x',y',Sr),grid
shading interp
xlabel('Длина дорожки')
ylabel('Номер дорожки')

zlabel('Профиль поверхности, мкм')
% Расчет показателя Херста
H=fher(Sr);
% Расчет фрактальной размерности
figure (8)
plot(2-H),grid
xlabel('Номер дорожки')
ylabel('Фрактальная размерность')

```

Программа фильтрации **fil.m**

```

function Df=fil(D)
[U,S,V]=svd(D);% SVD-разложение
[n,m]=size(S);
ds=diag(S);% Собственные числа
% Выделение низкочастотной части
dss=cumsum(ds.^2)/sum(ds.^2);
kn=1;
while dss(kn)<.95
    kn=kn+1;
end
kn=kn+1;
dn=ds(1:kn);
Sp=diag(dn,0)
Sn=zeros(n,m);
Sn(1:kn,1:kn)=Sp;
Dn=U*Sn*V';
Df=D-Dn;

function y=fsvd(p)
n=length(p);
l=100;
k=length(p)-l+1;
% Формирование матрицы
X=[];
for j=1:k
    X(:,j)=p(j:j+1-1);
end
% Восстановление ряда p=xc'
for m=2:k+1
    i=0;j=2;x=0;z=0;
    while i<k & j>1
        i=i+1;

```

```

        j=m-i;
        if j<l+1
            x=x+X(j,i);
            z=z+1;
        end
    end
end
    pp(m-1)=x/z;
end
% SVD-разложение
    S=X*X';
[U,D]=eig(S);
    V=X'*U*inv(sqrt(D));
    xs=zeros(1,n);
    for il=1:l
        A=sqrt(D(il,il))*U(:,il)*V(:,il)';
        for m=2:k+1
            i=0;j=2;x=0;z=0;
            while i<k & j>1
                i=i+1;
                j=m-i;
                if j<l+1
                    x=x+A(j,i);
                    z=z+1;
                end
            end
        end
    end
    xc(m-1)=x/z;
end
    xo(il,:)=xc;
    xs=xs+xc;
    end
    y=xo';

```

Программа raszrx.m

```

clear
L0=24.2e-6;Lx=25.6e-6;Rx=320;w=1e7;
wp=tf([L0+Lx Rx],[L0*Lx L0*Rx 0]);%Передаточная функция
Aw=abs(freqresp(wp,w));% АЧХ
Fw=angle(freqresp(wp,w));% ФЧХ
num=Rx^2+(L0+Lx)*w^2;
den=Rx^2+(w*Lx)^2;
Ar=sqrt(num/den)/(w*L0)
num=Rx^2+(L0+Lx)*Lx*w^2;
den=w*L0*Rx;
Fr=-atan(num/den)
z0=w*L0;zx=w*Lx;
C=1/(1/z0^2-Aw^2);
B=tan(Fw)*z0;
a=(z0-2*C/z0)/B;
b=C/B;
Px=[1+a^2 2*(a*b-C/z0) C+b^2];
r=roots(Px);

```

```
Zxr=-r(1);
Rxr=-((1-2*C/z0^2)*z0*Zxr-C)/B;
[zx Zxr]
[Rx Rxr]
```

Программа rasr.m

```
clear
L=[25.6 22.6 19.4 17.6 16.8]*10;
R=[320 282 255 223 212];
s=[.1 .8 1.5 2.2 2.8];
Zd=13.7850;
y=log(R-Zd);
a11=sum(y.^2);a12=-sum(y);a21=-a12;a22=-5;
b1=sum(s.*y);b2=sum(s);
d1=[b1 a12; b2 a22];
d2=[a11 b1; a21 b2];
d=[a11 a12; a21 a22];
kr=det(d1)/det(d);
b=det(d2)/det(d);
sr=kr*y-b;
e=sum((s-sr).^2)
Rn=exp(b/kr);
Rr=Rn*exp(s/kr)+Zd;
plot(s,R,s,Rr),grid
danr=[Rn kr Zd];
%save rk Rn kr Zd
```

Программа rasl.m

```
clear
f=1e6;% Рабочая частота датчика, Гц
w=2*pi*f;% Круговая частота рад/с
wL=w*[25.6 22.6 20.4 18.6 16.8]*1e-6;% Вносимое индуктивное
сопротивление, Ом
wL0=w*24.2*1e-6% Индуктивное сопротивление намагничивающего
контура, Ом
wL1=w*1.43*1e-6% Индуктивное сопротивление рабочей катушки;
R=[320 282 245 223 212];% Вносимое активное сопротивление , Ом
R1=4.8;% Активное сопротивление рабочей катушки , Ом
s=[.1 .8 1.5 2.2 2.8];% Зазор
Zd=wL1+R1;% Полное сопротивление рабочей катушки
% Расчет зависимости L=f(s)
y=log(wL-Zd);
a11=sum(y.^2);a12=-sum(y);a21=-a12;a22=-5;
b1=sum(s.*y);b2=sum(s);
d1=[b1 a12; b2 a22];
d2=[a11 b1; a21 b2];
d=[a11 a12; a21 a22];
k1=det(d1)/det(d);
b=det(d2)/det(d);
xLn=exp(b/k1);
sr=k1*y-b;
e=sum((s-sr).^2)% СКО ошибки аппроксимации
```

```
wLr=xLn*exp(s/kl)+Zd;% Расчетная кривая
danl=[xLn kl]
plot(s,wL,s,wLr),grid
%save lk xLn kl Zd
```

Программа af.m

```
clear
w=2*pi*1e6;
xLn=148.8;kl=-5.8446;;Rn=309;kr=-6.0090;Zd=14;L0=24.2*1e-6
s=[.1 .8 1.5 2.2 2.8];
wLr=xLn*exp(s/kl)+Zd;
Rx=Rn*exp(s/kr)+Zd;
Lx=wLr/w;
for i=1: length(s)
wd=tf([L0+Lx(i) Rx(i)], [L0*Lx(i) L0*Rx(i) 0])
bode(wd),grid
hold on
%pause
end
```

Программа расчета фрактальной размерности herst.m

```
function H=fher(Sr)
[n,m,]=size(Srd);
[X,Y]=meshgrid(1:n,1:m);
figure (1)
surfc(X',Y',d),grid
shading interp
for l=1:m
x=d(1:1000,l);% Выделение l -столбца и его усечение
sv=fsvd(x);% Сингулярное разложение x
x=x-sv(:,end);% Удаление тренда
%x=rand(1000,1);
%plot(x),grid
n=length(x);
%Расчет коэффициента Херста
MD=[2 4 5 10 50 100 200 500]; % Число рядов разбиения x
for k=1:length(MD)
md=MD(k);
dm=n/md;
Lmk(:,k)=log(dm);
    for i=1:md
        n1=dm*(i-1)+1;
        n2=i*dm;
        y(:,i)=x(n1:n2);
    end
E= mean(y);
```

```

S=std(y);
z0=0;
    for i=1:md
        for j=1:dm
            z=z0+y(j,i)-E(i);
            z0=z;
            w(:,j)=z;
        end
        R(:,i)=max(w)-min(w);
    %plot(R,'o')
    %pause
    clear w
    end

RS=R./S;
clear R
%plot(RS,'o')
RSs(:,k)=log(mean(RS));
%pause
clear y
end
figure (2)
%plot(Lmk,RSs,'o'),grid
hold on
p=polyfit(Lmk,RSs,1);
Rr=polyval(p,Lmk);
%plot(Lmk,Rr),grid
hold off
H(1,:)=p(1);
end
figure (2)
plot(H),grid

```

Программа rasprofilmod.m

```

clear
Raz=.5;% Параметр шероховатости
d=.1:.001:1;
n=length(d);
x=d.*randn(1004,1);
x=x-mean(x);
Ran=mean(abs(x));% Расчет шероховатости для d
[q,w]=min(abs(Ran-Raz));
dr=d(w);
Ra=Ran(w);% Выбор шероховатости
s=dr*randn(1004,1);
Ra=mean(abs(s));% Выбор шероховатости
pr=(s-min(s))
figure (1)
plot(pr,'k'),grid
xlabel('Относительная длина')
ylabel('Профиль поверхности, мкм')

```

```

% Расчет Rx
Rn=308.9536;kr= -6.0090;Zd=3.7850;
Rx=Rn*exp(pr/kr)+Zd;
figure (2)
plot(Rx,'k'),grid
xlabel('Относительная длина')
ylabel('Активное сопротивление, Ом')
% Расчет Lx
wLn=148.5672;kl=-5.8446;wL0=152.0531;w=2*pi*1e6;
wLx=wLn*exp(s/kl)+Zd;
figure (3)
plot(wLx,'k'),grid
xlabel('Относительная длина')
ylabel('Индуктивное сопротивление, Ом')
%Расчет тока
Id=sqrt((Rx.^2+(wL0+wLx).^2)./(Rx.^2+wLx.^2))/wL0;
figure (4)
plot(10*Id,'k'),grid
xlabel('Относительная длина')
ylabel('Ток, А')
%Расчет фазы
figure (5)
fi=atan((Rx.^2+(wL0+wLx).*wLx)./(wL0*Rx));
plot(fi,'k'),grid
xlabel('Относительная длина')
ylabel('Фаза, рад')

```

Программа rasprofil.m

```

clear
Raz=.5;% Параметр шероховатости
d=.1:.001:1;
n=length(d);
x=d.*randn(1004,1);
x=x-mean(x);
Ran=mean(abs(x));% Расчет шероховатости для d
[q,w]=min(abs(Ran-Raz));
dr=d(w);
Ra=Ran(w);% Выбор шероховатости
s=dr*randn(1004,1);
Ra=mean(abs(s));% Выбор шероховатости
pr=(s-min(s))
figure (1)
plot(pr),grid
% Расчет Rx
Rn=308.9536;kr= -6.0090;Zd=3.7850;
Rx=Rn*exp(pr/kr)+Zd;
figure (2)
plot(Rx),grid
% Расчет Lx
wLn=148.5672;kl=-5.8446;wL0=152.0531;w=2*pi*1e6;
wLx=wLn*exp(s/kl)+Zd;

```

```

figure (3)
plot(wLx),grid
%Расчет тока
Id=sqrt(Rx.^2+(wL0+wLx).^2./(Rx.^2+wLx.^2))/wL0;
figure (4)
plot(Id),grid
%Расчет фазы
figure (5)
fi=atan((Rx.^2+(wL0+wLx).*wLx)./(wL0*Rx));
plot(fi),grid

```

«Радиальная базисная сеть»

```

mclear
load u
%Формирование обучающей выборки
P=d;% Вход нейронной сети
T=1:16;T=T;% желаемы выход нейронной сети
% Формирование нейронной сети
%PR=[0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1]; % ограничения по входу и выходу
S1=2;S2=1; первом и втором слоях
netrb=newrbe(P, T);
ym=sim(netrb,P);
figure (2)% построение график аошибки
plot(100*(T'-ym')./mean(T')),grid
%gensim(netrb)% Передача сети в Simulink
iw1=netrb.IW{:};
iw11=iw1(1,:);
iw12=iw1(2,:);
iw2=netrb.LW{2,:};
%b1=nets.b{:};
%b2=nets.b{2,1}
figure (1)
plot(P'),grid
xlabel('номер дефекта')
ylabel('значение фрактальной размерности')
figure (2)
plot(T-ym),grid
xlabel('номер дефекта')
ylabel('абсолютная ошибканачение фрактальной размерности')
figure (2)
gensim (netrb)
e=100*std(T'-ym')./mean(T')
>> mean(P)

```

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Копии актов о внедрении результатов научной работы

АО «ЕПК Саратов»
Россия, 410039, г.Саратов,
Проспект Энтузиастов, 64 А

АО EPK Saratov
Russia, 410039, Saratov,
Prospect Entuziastov 64 A

Тел./tel: +7(8452) 30-96-25, 30-96-77
Факс/fax: +7(8452) 30-98-02
info.saratov@epkgroup.ru www.epkgroup.ru



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Вахидовой К.Л. «Совершенствование вихретокового контроля и диагностики дефектов поверхностей деталей подшипников с использованием фрактального анализа, и искусственных нейронных сетей»

Научно - техническая комиссия АО "ЕПК Саратов" в составе:

- Стародубцев В.Ю. - начальник ОСК;
- Лукашов С.В. – нач-к ОТК;
- Калашникова О.В. – зам. нач-ка ОТК.

составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы использованы при распознавании локальных дефектов поверхностного слоя колец подшипников. В частности, применяются прибором ПВК-К2М. В прибор введены следующие алгоритмы:

- Алгоритм формирования 3D-поверхностей деталей качения подшипников по сигналам вихретокового датчика, позволяющий оценить шероховатость шлифованной поверхности.
- Алгоритм диагностирования дефектов поверхностей деталей подшипников с использованием фрактального анализа, и искусственных нейронных сетей.
- Специализированный программный модуль, выполненный в SCADA – системе TRACE MODE.

Эффективность внедрения результатов диссертационной работы позволяют повысить достоверность вихретокового контроля, тем самым снизить выпуск несоответствующей (бракованной) продукции.

Начальник ОСК



Стародубцев В.Ю.

Начальник ОТК



Лукашов С.В.

Зам. начальника ОТК



Калашникова О.В.

р/с 40702810214240001608
к/с 30101810200000000837
Филиал Банка ВТБ (ПАО) в г. Нижнем Новгороде
БИК 042202837 ИНН 6451104638
КПП 645101001 ОКПО 05808824 ОКЕЭД 28.15.1
Исполнительный директор ОАО «УК ЕПК»
Денисенко Александр Николаевич



«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор -
проректор по учебной работе

д.т.н. И.Г. Гайрабеков

25 2022г



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результаты диссертационной работы Вахидовой Карины Лечиевны на тему «Совершенствование вихретокового контроля и диагностики дефектов поверхностей деталей подшипников с использованием фрактального анализа, и искусственных нейронных сетей» внедрены в учебный процесс на кафедре «Автоматизация технологических процессов и производств» института энергетики ФГБОУ ВО «Грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова» и использованы в учебном процессе по курсам «Техническая диагностика автоматизированных систем» для бакалавров 15.03.04. «Автоматизация технологических процессов и производств», 27.03.04 «Управление в технических системах»

Директор ДУМР

Магомаева М.А.

И.О. зав. каф. к.т.н. «АТПП»

Хакимов З.Л.

Соискатель

Вахидова К.Л.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017611861

**«Программа диагностирования и принятие решений по
качеству поверхности кольца подшипника»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова» (RU)*

Авторы: *Вахидова Карина Лечиевна (RU), Минцаев Магомед Шавалович (RU), Игнатъев Станислав Александрович (RU), Казинский Никита Алексеевич (RU)*

Заявка № **2016663756**

Дата поступления **14 декабря 2016 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **09 февраля 2017 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019613576

«Программа интерфейса для расчёта коэффициентов уравнения линейной регрессии, построения графика и определения коэффициента корреляции»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова» (RU)*

Авторы: *Вахидова Карина Лечиевна (RU), Сперанский Сергей Константинович (RU), Родионов Игорь Владимирович (RU), Симонов Кирилл Владимирович (RU)*

Заявка № 2019612347

Дата поступления 07 марта 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 19 марта 2019 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021668885

«Программа расчета фрактальной размерности с использованием сингулярной фильтрации для оценки показателей качества шлифованных поверхностей»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова» (RU)*

Авторы: *Вахидова Карина Лечиевна (RU), Семенов Анатолий Дмитриевич (RU)*

Заявка № 2021668412

Дата поступления 17 ноября 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 22 ноября 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

