

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Разработка алгоритмов обработки сигналов вихревых преобразователей
для компьютерной дефектоскопии подшипников**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2211 группы

направления 03.04.01 Прикладные математика и физика

Института физики

Любимова Кирилла Михайловича

Научный руководитель
Профессор, д.т.н.

подпись, дата

Л.С. Сотов

Зав. кафедрой
нелинейной физики
к.ф.-м.н., доцент

подпись, дата

Е.Н. Бегинин

Саратов 2026 г.

Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения достоверности автоматизированного вихретокового контроля роликов подшипников. В условиях серийного производства особое значение приобретает обеспечение высокой точности выявления поверхностных и приповерхностных дефектов, поскольку их наличие может привести к снижению ресурса изделия, возникновению вибраций, ускоренному износу и отказу оборудования. Одним из наиболее эффективных методов неразрушающего контроля является вихретоковая дефектоскопия, позволяющая обнаруживать дефекты без разрушения изделия и обеспечивающая возможность полной автоматизации процесса контроля.

Однако эффективность автоматизированного вихретокового контроля в значительной степени определяется качеством алгоритмов программной обработки сигналов. При обработке реальных сканограмм возникают сложности, связанные с наличием шумов, импульсных выбросов и дефектоподобных областей, что может приводить к ложной браковке годных изделий. В связи с этим возникает необходимость совершенствования существующих алгоритмов обработки сигналов и разработки более устойчивых методов распознавания дефектных областей.

Целью работы является анализ и модернизация алгоритмов обработки сигналов вихретоковых преобразователей для компьютерной дефектоскопии поверхностей роликов подшипников с целью повышения устойчивости распознавания дефектных областей и снижения влияния случайных импульсных помех.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Рассмотрены основные методы дефектоскопии и особенности вихретокового контроля.
2. Исследованы состав и принцип работы автоматизированной установки вихретокового контроля роликов подшипников.

3. Выполнен анализ существующего алгоритма обработки сигналов, реализованного в программном обеспечении HROT.

4. Выявлены ограничения исходного алгоритма, связанные с пороговой обработкой и ложными срабатываниями.

5. Разработан алгоритм классификации дефектоподобных областей, учитывающий их пространственные характеристики.

6. Проведена проверка предложенного алгоритма на модельных и реальных данных.

Объектом исследования являются сигналы вихретоковых преобразователей, получаемые при контроле поверхностей роликов подшипников в автоматизированной установке дефектоскопии.

Предметом исследования являются алгоритмы программной обработки вихретоковых сигналов и сканограмм, используемые для выделения дефектных областей и принятия решения о годности контролируемого изделия.

Материалами исследования послужили сигналы вихретоковых преобразователей, сканограммы поверхностей роликов подшипников, полученные в процессе работы автоматизированной установки вихретокового контроля, а также модельные данные, использованные для проверки разработанного алгоритма.

Научная новизна работы заключается в разработке алгоритма классификации дефектоподобных областей, который, в отличие от существующего подхода, учитывает не только факт превышения порогового уровня сигнала, но и пространственные характеристики обнаруженных областей, включая их форму, протяжённость, площадь, связность и характер распределения точек на сканограмме.

Научная значимость работы заключается в развитии подходов к программной обработке данных вихретокового контроля и повышении устойчивости распознавания дефектных областей в условиях наличия импульсных помех и локальных нестабильностей сигнала.

Практическая значимость работы заключается в повышении надёжности автоматизированного контроля за счёт более точного разделения реальных дефектов и импульсных помех, что позволяет снизить вероятность ложной браковки при сохранении чувствительности к опасным дефектам.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованных источников. В первой главе рассматриваются методы дефектоскопии и физические основы вихретокового контроля. Во второй главе приводится описание автоматизированной установки вихретокового контроля роликов подшипников, её состава, принципов работы и формирования сканограмм. В третьей главе выполнен анализ существующего алгоритма обработки сигналов, реализованного в программном обеспечении HROT. В четвёртой главе представлена разработка модернизированного алгоритма классификации дефектоподобных областей, а также результаты его проверки на модельных и реальных данных.

Основное содержание работы

В главе 1 «Теоретические основы вихретокового контроля» рассматривались физические принципы вихретоковой дефектоскопии, особенности взаимодействия переменного электромагнитного поля с проводящими материалами, а также методы обработки информации, применяемые в современных системах компьютерной дефектоскопии.

В разделе 1.1 «Физические основы вихретокового контроля» были рассмотрены механизмы возникновения вихревых токов и их зависимость от электрических и геометрических характеристик контролируемого объекта [1, 2]. Особое внимание уделялось скин-эффекту, определяющему глубину проникновения электромагнитного поля и чувствительность метода к поверхностным и приповерхностным дефектам.

В разделе 1.2 «Влияние дефектов на параметры вихретокового сигнала» рассматривалось влияние трещин, прижогов, раковин и других нарушений структуры материала на распределение вихревых токов и формирование сигнала преобразователя [3-7]. Было показано, что наличие

дефектов приводит к локальному изменению амплитудных и фазовых характеристик измеряемого сигнала.

В разделе 1.3 «Алгоритмы обработки данных компьютерной дефектоскопии» рассматривались существующие подходы к извлечению признаков, фильтрации сигналов и принятию решения о наличии дефектов. Были проанализированы методы пороговой обработки, выделения характерных областей и использования пространственных характеристик дефектоподобных структур [8].

В разделе 1.4 «Методы неразрушающего контроля» были рассмотрены основные способы выявления дефектов деталей машиностроения, включая ультразвуковой, рентгенографический, магнитный, капиллярный и вихретоковый методы контроля [8, 9]. Был проведён сравнительный анализ их возможностей, преимуществ и ограничений. Показано, что вихретоковый метод наиболее эффективно применяется для автоматизированного контроля поверхностных и приповерхностных дефектов деталей подшипников.

В разделе 1.5 «Применение вихретокового контроля в автоматизированных системах дефектоскопии» были рассмотрены современные подходы к организации автоматизированного контроля деталей подшипников, особенности использования вихретоковых преобразователей и методы обработки измерительной информации [9, 10]. Было показано, что внедрение программных средств обработки сигналов позволяет повысить производительность контроля и снизить влияние человеческого фактора на принятие решения о годности изделия.

В разделе 1.6 «Постановка задачи исследования» были сформулированы основные ограничения существующих подходов к обработке вихретоковых сигналов. Установлено, что применение исключительно пороговых методов обработки может приводить к возникновению ложных срабатываний при наличии импульсных выбросов и локальных помех. В связи с этим была обоснована необходимость разработки

модернизированного алгоритма, учитывающего пространственные характеристики дефектоподобных областей и позволяющего повысить достоверность автоматизированного контроля роликов подшипников

В главе 2 «Автоматизированная установка вихретокового контроля роликов подшипников» рассматривались состав установки, принципы её работы и особенности формирования измерительной информации, где было установлено, что эффективность автоматизированного контроля определяется не только характеристиками вихретоковых преобразователей и аппаратной части системы, но и качеством программной обработки получаемых данных. Были рассмотрены назначение установки, её основные функциональные элементы, порядок получения измерительных сигналов и формирование сканограмм контролируемых поверхностей. Показано, что представление результатов контроля в виде двумерных сканограмм позволяет анализировать пространственное распределение сигналов и использовать дополнительные признаки для более достоверного распознавания дефектных областей. Также было установлено, что для повышения надёжности принятия решения о годности изделия необходимо учитывать не только локальные превышения порогового уровня сигнала, но и пространственную структуру обнаруженных областей.

В разделе 2.1 «Назначение автоматизированной установки» было показано, что установка предназначена для автоматического контроля поверхностей роликов подшипников и выявления дефектов без участия оператора [12].

В разделе 2.2 «Состав установки» были рассмотрены основные компоненты системы, включающие механическую часть, вихретоковые преобразователи, систему сбора данных и программное обеспечение HROT, осуществляющее обработку результатов измерений [13].

В разделе 2.3 «Принцип работы установки» была описана последовательность операций контроля, включающая вращение ролика,

регистрацию сигналов с датчиков, формирование массивов измерительной информации и построение сканограмм поверхностей [13].

В разделе 2.4 «Формирование и анализ сканограмм» были рассмотрены особенности представления измерительной информации в виде двумерных карт распределения сигналов. Было показано, что анализ пространственной структуры дефектоподобных областей позволяет более достоверно разделять реальные дефекты и случайные помехи.

В разделе 2.5 «Программное обеспечение HROT» были рассмотрены назначение, структура и основные функции программного обеспечения, используемого для обработки результатов вихретокового контроля. Было показано, что программа обеспечивает приём измерительных данных, их предварительную обработку, построение сканограмм и формирование итогового решения о годности или браке контролируемого изделия [14, 15].

В разделе 2.6 «Особенности представления результатов контроля» были рассмотрены способы визуализации измерительной информации и порядок отображения дефектоподобных областей на сканограммах. Показано, что использование графического представления данных позволяет оперативно оценивать распределение сигналов по поверхности ролика и облегчает последующий анализ обнаруженных областей [16].

В разделе 2.7 «Выводы по главе» было установлено, что существующая автоматизированная система вихретокового контроля обеспечивает получение полного набора измерительных данных, необходимых для анализа состояния поверхности роликов подшипников [17, 18]. Вместе с тем показано, что повышение достоверности контроля в значительной степени зависит от совершенствования алгоритмов программной обработки сканограмм, что определило направление дальнейших исследований, представленных в последующих главах работы.

В главе 3 «Анализ существующего алгоритма обработки сигналов» проводилось исследование программной реализации алгоритма, используемого в программном обеспечении HROT, а также выявлялись его

ограничения, влияющие на достоверность автоматизированного вихретокового контроля.

В разделе 3.1 «Цель анализа исходного кода» была обоснована необходимость исследования существующего алгоритма обработки сигналов для выявления его преимуществ и недостатков. Было показано, что анализ программной реализации необходим для последующей модернизации системы и повышения устойчивости распознавания дефектных областей.

В разделе 3.2 «Структура программного модуля» была рассмотрена организация программного обеспечения и взаимосвязь основных компонентов системы обработки данных. Показано, что программный модуль состоит из последовательных этапов приёма, преобразования и анализа измерительной информации.

В разделе 3.3 «Последовательность обработки данных» была рассмотрена полная цепочка обработки измерительной информации, включающая получение сигналов, их предварительную обработку, построение сканограмм и принятие итогового решения о годности изделия.

В разделе 3.4 «Получение измерительных данных» был рассмотрен процесс регистрации сигналов от вихретоковых преобразователей и формирования исходных массивов данных, используемых при последующей обработке.

В разделе 3.5 «Формирование сканограмм и преобразование координат» были рассмотрены процедуры построения двумерных сканограмм контролируемой поверхности и методы преобразования координат измерительных точек. Показано, что такой способ представления информации позволяет анализировать пространственное распределение дефектоподобных областей.

В разделе 3.6 «Подавление одиночных выбросов и формирование сигналов» были проанализированы методы устранения локальных помех и подготовки сигналов к дальнейшей обработке. Было показано, что

предварительная фильтрация позволяет уменьшить влияние случайных нестабильностей измерительного процесса [20].

В разделе 3.7 «Масштабирование и приведение сигнала к условной глубине дефекта» была рассмотрена процедура нормализации измерительных данных и приведения амплитуды сигнала к условным характеристикам дефекта, что обеспечивает единообразие последующего анализа.

В разделе 3.8 «Поиск дефектов по заполнению скользящего окна» был рассмотрен механизм выделения областей превышения порогового уровня и алгоритм анализа локальных областей при помощи скользящего окна [19].

В разделе 3.9 «Особенности обработки пятен и прижогов» были рассмотрены особенности распознавания различных типов дефектов поверхности и показано, что характер их отображения на сканограммах требует использования дополнительных признаков анализа.

В разделе 3.10 «Ускоренный анализ скользящего окна» были рассмотрены способы оптимизации вычислительных процедур, позволяющие уменьшить время обработки данных без снижения качества распознавания дефектов.

В разделе 3.11 «Автоматический цикл и связь с ПЛК» была рассмотрена организация взаимодействия программного обеспечения с промышленным контроллером и описан автоматический цикл функционирования установки, обеспечивающий непрерывный процесс контроля изделий [21].

Проведённый анализ показал, что существующий алгоритм эффективно выявляет выраженные дефекты, однако его работа в значительной степени основана на пороговой обработке сигнала. При наличии одиночных импульсных выбросов и локальных шумовых помех это может приводить к ложным срабатываниям и ошибочной браковке годных изделий.

В разделе 3.12 «Ограничение исходного алгоритма как основание для модернизации» было установлено, что превышение порогового уровня не всегда свидетельствует о наличии реального дефекта. Было показано, что для повышения достоверности контроля необходимо учитывать пространственную связность, форму, протяжённость и плотность распределения точек в обнаруженных областях, что послужило основанием для разработки модернизированного алгоритма обработки сканограмм.

В главе 4 «Разработка модернизированного алгоритма обработки сканограмм» была предложена доработка существующего подхода, направленная на повышение устойчивости распознавания дефектных областей.

В разделе 4.1 «Постановка задачи модернизации алгоритма» была сформулирована необходимость дополнительной классификации обнаруженных областей после выполнения стандартной пороговой обработки.

В разделе 4.2 «Общая логика работы алгоритма» был разработан механизм разделения найденных областей на три категории: реальные дефекты (real_defect), импульсные выбросы (pichki) и спорные области (uncertain). Было принято правило, согласно которому спорные области рассматриваются как потенциальный брак с целью сохранения требуемого уровня безопасности контроля.

В разделе 4.3 «Формирование признаков классификации» были разработаны количественные характеристики обнаруженных областей, включающие площадь области, её протяжённость по осям, количество исходных точек, максимальную длину непрерывных участков, коэффициент вытянутости и коэффициент заполнения. Использование данных признаков позволило более полно описывать пространственную структуру дефектоподобных областей.

В разделе 4.4 «Распознавание протяжённых дефектов» были разработаны критерии выделения тонких и протяжённых дефектов, которые могли быть пропущены при использовании только пороговой обработки.

В разделе 4.5 «Выделение импульсных выбросов» были сформулированы признаки, позволяющие отличать случайные локальные помехи от реальных дефектов.

В разделе 4.6 «Обработка спорных областей» был реализован механизм дополнительного анализа неоднозначных ситуаций, позволяющий принимать более осторожное решение о годности изделия.

В разделе 4.7 «Проверка алгоритма на модельных данных» была проведена серия вычислительных экспериментов. Результаты показали, что при наличии только импульсных выбросов алгоритм не формирует ложное решение о браке, а при наличии протяжённых дефектов сохраняет их корректное обнаружение.

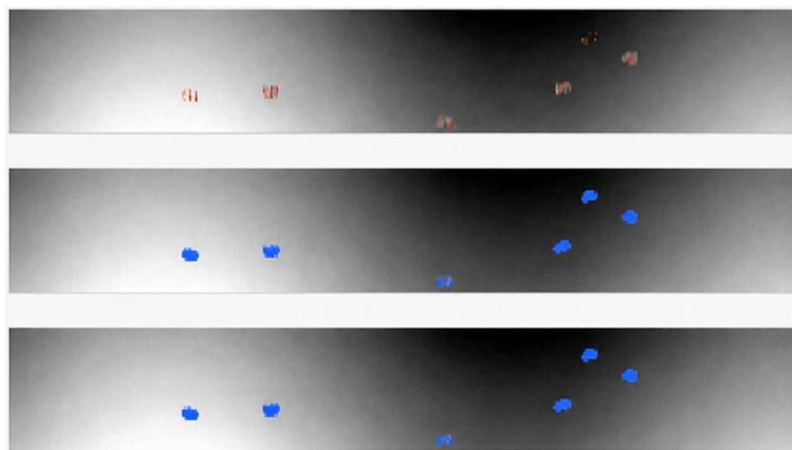


Рис.1 Сравнение работы оригинального и улучшенного алгоритма. Первый набор данных.

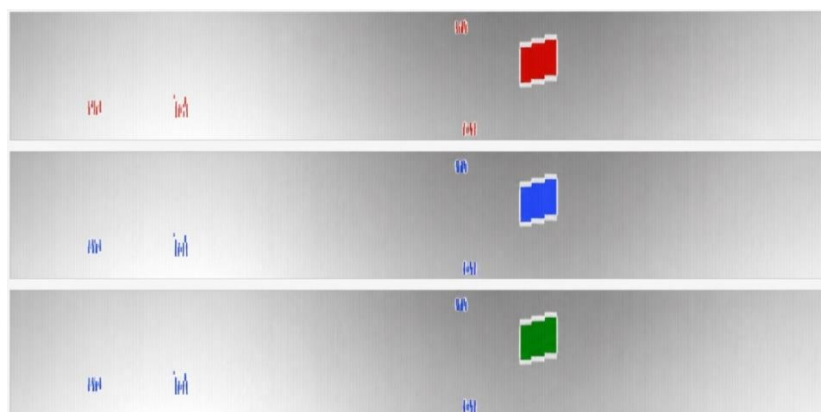


Рис.2 Сравнение работы оригинального и улучшенного алгоритма. Второй набор данных.

В разделах 4.8–4.10 «Проверка алгоритма на реальных данных» проводилось тестирование разработанного подхода на сканограммах, полученных в процессе промышленного контроля роликов подшипников. Было подтверждено, что алгоритм позволяет более достоверно разделять реальные дефекты и шумовые помехи, а также уточнять результаты работы исходной системы за счёт дополнительного анализа пространственной структуры дефектоподобных областей. Установлено, что применение разработанного подхода способствует снижению количества потенциальных ложных браковок при сохранении чувствительности к реальным дефектам, что повышает надёжность автоматизированного контроля и обоснованность принятия решения о годности изделия.

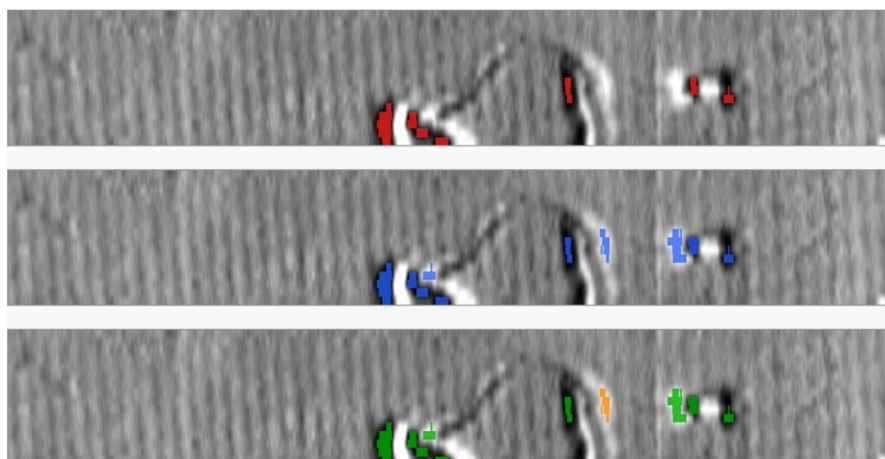


Рис.3 Результат работы нового алгоритма обнаружения.

На рисунке 4 представлен второй пример обработки данных. Видно, что вся область была отнесена к классу дефекта, что ещё раз подтверждает корректность работы программы не только на смоделированных сигналах, но и на реальных сигналах.

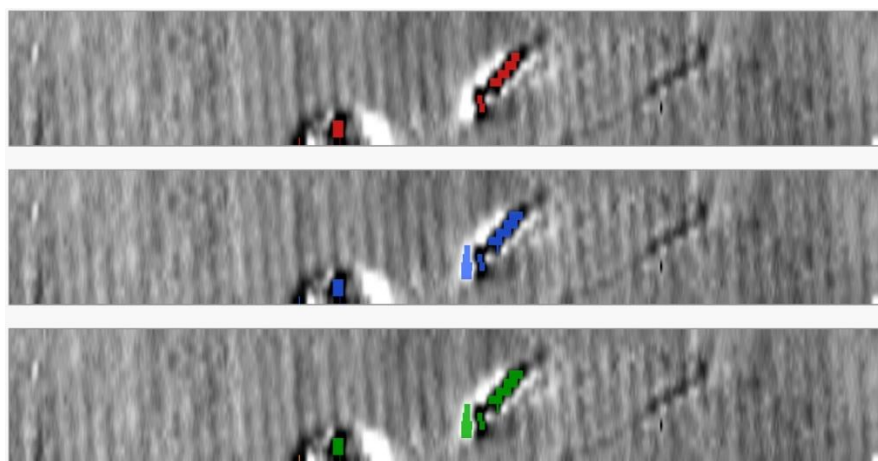


Рис.4 Результат работы нового алгоритма обнаружения.

На рисунке 5 представлен хороший пример сканограммы с большим количеством шумов и помех.

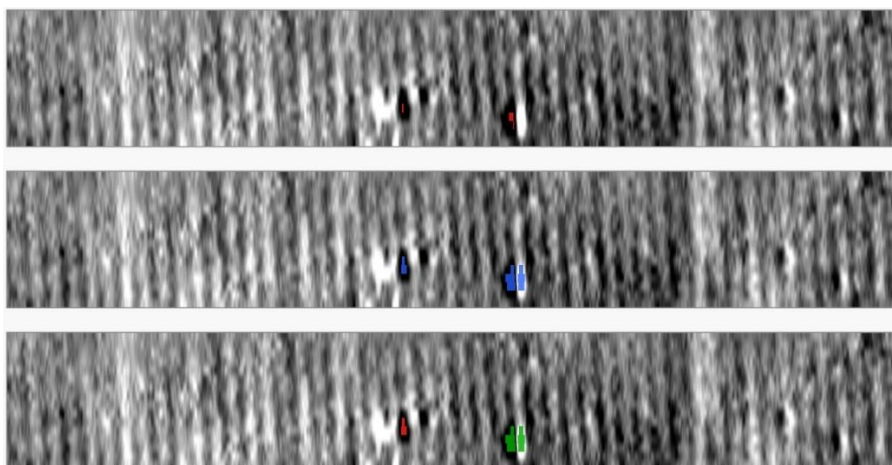


Рис.5 Результат работы нового алгоритма обнаружения в тяжёлых условиях.

В разделе 4.11 «Анализ результатов работы алгоритма» были выполнены сравнительные испытания разработанного и исходного подходов. Результаты показали, что предложенная доработка позволяет снизить количество потенциальных ложных браковок приблизительно на 20 % при сохранении чувствительности к реальным дефектам.

Заключение

В работе проведён анализ автоматизированной обработки сигналов вихретоковых преобразователей при контроле поверхностей роликов подшипников. Рассмотрены принципы работы автоматизированной установки вихретокового контроля, особенности формирования сканограмм и алгоритм обработки данных, реализованный в программном обеспечении HROT.

Анализ существующего алгоритма показал, что его работа в значительной степени основана на пороговой обработке сигналов, что может приводить к ложным срабатываниям при наличии импульсных выбросов и локальных помех. В связи с этим была обоснована необходимость дополнительного анализа дефектоподобных областей с учётом их пространственной структуры.

Для повышения достоверности контроля разработан алгоритм классификации дефектоподобных областей, учитывающий их форму, размеры, протяжённость, связность и характер распределения точек на сканограмме. Предложенный подход позволяет разделять реальные дефекты, импульсные выбросы и спорные области без снижения чувствительности к потенциально опасным нарушениям поверхности.

Проверка алгоритма на модельных и реальных данных показала его работоспособность и способность снижать количество потенциальных ложных браков при сохранении обнаружения реальных дефектов.

Таким образом, цель работы достигнута: выполнен анализ существующего алгоритма обработки вихретоковых сигналов, выявлены его ограничения и предложена программная доработка, повышающая устойчивость распознавания дефектных областей. Практическая значимость работы заключается в возможности повышения достоверности автоматизированного контроля роликов подшипников без изменения аппаратной части установки за счёт совершенствования программной обработки сканограмм.

Список используемых источников

1. Марков А. А., Шпагин Д. А. Ультразвуковая дефектоскопия рельсов. – 2008.
2. Бархатов В. А. Развитие методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений //Дефектоскопия. – 2003. – Т. 1. – С. 28-55.
3. Кесова Е. Ф., Терещенко И. А. Обзор метода ультразвуковой дефектоскопии //Referatotech. – 2020. – С. 43-46.
4. Лебедев М. Б., Сидуленко О. А., Удод В. А. Анализ современного состояния и развития систем цифровой рентгенографии //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2008. – Т. 312. – №. 2S. – С. 47-55.
5. Бакунов А. С., Горкунов Э. С., Щербинин В. Е. Магнитный контроль. – 2011.
6. Сайфутдинов С. М. Капиллярный контроль: история и современное состояние //В мире неразрушающего контроля. – 2008. – №. 1. – С. 14-18.
7. Силин Н. В., Коровкин Н. В. Электромагнитный контроль электроэнергетического оборудования //Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2008. – №. 4. – С. 186-192.
8. Учанин В. Н., Александров С. А., Цыганов В. Ю. Вихретоковая дефектоскопия деталей авиационных двигателей в условиях эксплуатации и ремонта //Вісникдвигунобудування. – 2009. – №. 2. – С. 151-155.
9. Федосенко Ю. К., Шкатов П. Н., Ефимов А. Г. Вихретоковый контроль. – 2011.
10. Бобров А. Л., Власов К. В., Бехер С. А. Основы вихретокового неразрушающего контроля. – 2019.
11. Шубочкин А. Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. – 2014.
12. Пчелинцев Д. О. Автоматизация распознавания локальных дефектов поверхностного слоя колец подшипников с применением вейвлет-преобразований при вихретоковом контроле в системе мониторинга //Саратов: СГТУ. – 2009.
13. Легаев В. П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении: учебное пособие. – 2009.
14. Бабаджанов Л. С. и др. Вихретоковый контроль поверхностного слоя деталей подшипников с оценкой геометрических параметров дефектов //Законодательная и прикладная метрология. – 2013. – №. 1. – С. 031-035.

15. Игнатъев М. А., Игнатъев А. А. Обработка измерительной информации с вихретокового датчика при локализации дефектов поверхностного слоя деталей подшипников //Инженерный вестник Дона. – 2025. – №. 3 (123). – С. 729-746.
16. Горбунов В. В., Самойлова Е. М., Игнатъев А. А. Автоматизация вихретокового контроля поверхностного слоя деталей подшипников с применением технологии нейронных сетей //Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – №. 4 (40). – С. 114-122.
17. Ключев В. В., Федосенко Ю. К., Мужичкий В. Ф. Вихретоковый контроль: современное состояние и перспективы развития //В мире неразрушающего контроля. – 2007. – №. 2. – С. 4-9.
18. Вялов В. В., Горбунов В. В., Игнатъев С. А. Вихретоковый контроль качества поверхностного слоя роликов подшипников как метод корректировки работы шлифовальных станков //Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2007. – Т. 1. – №. 2. – С. 69-73.
19. Игнатъев А. А. и др. Вихретоковый контроль колец подшипников с применением вейвлет-преобразований //прогрессивные технологии в современном машиностроении. Материалы и технологии XXI века: сборник статей. – 2020. – С. 34.
20. Шумарова О. С., Игнатъев С. А., Самойлова Е. М. Автоматизация распознавания дефектов шлифовальных поверхностей деталей подшипников при вихретоковом контроле с обоснованием выбора вида вейвлета //Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – №. 1 (33). – С. 121-132.
21. Тихонский Н. Д., Попова Д. А., Дмитриев С. Ф. Использование автоматизированных систем позиционирования в вихретоковых методах исследования //Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем. – 2021. – С. 66-69.