

На правах рукописи



ЖИЛЬНИКОВ Артем Александрович

**СПОСОБ И АЛГОРИТМЫ МАГНИТОИНДУКЦИОННОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛ ВНУТРИ ОБЪЕКТОВ**

Специальность: 05.11.16
«Информационно-измерительные и управляющие системы
(в технических системах)»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» на кафедре «Информационно-измерительная и биомедицинская техника».

Научный руководитель: **Жулев Владимир Иванович,**
доктор технических наук, профессор,
заслуженный работник высшей школы РФ,
заведующий кафедрой «Информационно-
измерительная и биомедицинская техника»
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет», г. Рязань

Официальные оппоненты: **Дмитриев Олег Сергеевич,**
доктор технических наук, профессор, академик
РАЕН, заведующий кафедрой «Физика»
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный
технический университет», г. Тамбов

Ромащенко Михаил Александрович,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Конструирование и производство
радиоаппаратуры» ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», г. Воронеж

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Южно-Российский
государственный политехнический университет
(НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск

Защита состоится 5 октября 2018 года в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.211.04 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» и на сайте www.rsgeu.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время необходимость исследования внутреннего содержания промышленных изделий и образцов проб на предмет соответственно технического контроля ферромагнитных компонентов и определения присутствия в них включений, обладающих ферромагнитными свойствами, актуальна на производстве, в научных изысканиях, здравоохранении, при обеспечении безопасности людей и т.д.

Неотъемлемые компоненты изделий представляют собой конструктивно предусмотренные размещенные внутри них ферромагнитные тела, которые по отношению к остальному, немагнитному, содержанию изделия имеют ярко выраженные магнитные свойства. При производстве или последующей эксплуатации изделий возможны отдельные нарушения пространственного положения этих компонентов вследствие их смещения, изменения геометрических размеров, формы или ориентации. В свою очередь, включениями являются ферромагнитные составляющие, внедренные в объекты естественным или случайным образом. Природа происхождения включений может быть разнообразной, поэтому особенного внимания требует регистрация их выявления в виде информативных примесей и вкраплений, инородных частиц, небезопасных посторонних попаданий.

Повышение уровня надежности и непрерывно возрастающие требования к качеству указанных изделий диктуют необходимость постоянного совершенствования технологии их производства, а также методов контроля. В связи с этим все большую значимость в современной промышленности приобретает проблема контроля изделий на предмет определения пространственного положения внутренних ферромагнитных компонентов. На сегодняшний день ее решение осуществляется различными методами ультразвукового и рентгеновского неразрушающего контроля (НК), которые наряду с достоинствами обладают очевидными недостатками, так как не позволяют полностью охватить рассматриваемую проблему. Для обеспечения максимальной гарантии качества изделий необходимо выполнение комплекса различных по физической сути методов, приемов и технических средств, что приводит процесс контроля к увеличенным и порой неоправданным затратам времени, материальных средств и человеческого ресурса.

В качестве альтернативного решения по определению компонентов и выявлению различных включений в изделиях все более активно используется магнитный НК, являющийся в настоящее время одним из действенных резервов повышения качества, надежности и безопасности, а также находится на очередном витке развития.

Методы на основе магнитного НК базируются на анализе взаимодействия магнитного поля (МП) с ферромагнетиками. Однако из-за метрологических трудностей, возникающих при проникновении внутрь изделий и образцов, проблема объемного исследования внутренней структуры известными магнитными методами остается до конца не решенной.

Важность развития методов на основе магнитного НК определяется и новыми задачами, обусловленными стремительным прогрессом науки и техники. На сегодняшний день многие из них уже не поддаются решению известными методами, а использование серийно выпускаемых устройств и технических средств неэффективно из-за ограниченных возможностей контроля.

Таким образом, вышеизложенное подтверждает актуальность разработки новых методов и технических средств магнитного исследования и контроля, которые позволят без механического проникновения внутрь и повреждения образцов и изделий, сохранив их целостность и пригодность для дальнейшего применения по прямому назначению, обнаружить содержащиеся внутри ферромагнитные компоненты и включения.

Степень разработанности темы. Магнитный вид контроля относится к одному из первых видов НК, который был использован для диагностики продукции и промышленных объектов. Широкая номенклатура испытываемых изделий предполагает достаточно большое разнообразие методов, средств и технологических приемов магнитного контроля. Данным разработкам посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных авторов: В.В. Аркадьева, С.Т. Назарова, А.С. Фалькевич, М.Н. Михеева, С.В. Вонсовского, Я.С. Шур, Е.И. Кондорского, И.Н. Ермолова, Т.Я. Гораздовского, В.Г. Герасимова, В.К. Ключева, Ф. Ферстера (Германия), Е. Кнеллера (Германия) и др.

Особое место в развитии магнитного исследования изделий принадлежит двум научным школам – физикомагнитологов Р.И. Януса и Н.С. Акулова, трудами которых заложены основы практического использования методов на основе магнитного НК. Начатые ими работы продолжают успешно развиваться.

Несмотря на то, что к настоящему времени накоплен значительный опыт проведения магнитного НК, который широко отражен в монографиях, справочниках и пособиях, систематизированной литературы, посвященной рассматриваемой проблеме, очень мало. Таким образом, оставаясь слабо освещенной в научных работах, данная проблема продолжает быть весьма актуальной, о чем свидетельствуют публикации в печати.

Объект исследования. Образцы, материалы, полуфабрикаты, биологические ткани и органы, подвергшиеся инвазии металла, и готовые изделия (далее – объект), имеющие скрытые внутри инородные или конструктивно предусмотренные внедренные ферромагнитные тела, которые по отношению к остальному, немагнитному содержанию объекта способны достаточно сильно проявлять свои магнитные характеристики под воздействием внешнего (намагничивающего) МП.

Целью диссертации является расширение функциональных возможностей магнитного неразрушающего контроля посредством предложенной в работе информационно-измерительной системы (ИИС), осуществляющей неразрушающее магнитное исследование и позволяющей получать изображение границ пространственного расположения ферромагнитных включений и компонентов внутри объектов в местах, недоступных для механического проникновения.

Поставленная цель предполагает решение следующих **задач**:

1. Проведение анализа известных методов на основе магнитного неразрушающего контроля и технических средств, позволяющих локализовать неоднородности МП, вызванные формой и структурой ферромагнетиков, внутри объекта.
2. Выбор известного системообразующего (базисного) метода и физического принципа, расширяющего его функциональные возможности; описание механизмов интеграции математического аппарата принципа в алгоритм работы метода.

3. Разработка нового способа, реализующего неразрушающее магнитное исследование, обладающего функциональной возможностью получения изображения границ пространственного расположения ферромагнитных тел внутри объектов.

4. Разработка алгоритма магнитного исследования и проверки его работоспособности на образцах простой геометрической формы посредством вычислительного моделирования процессов измерения.

5. Разработка структуры информационно-измерительной системы, реализующей предложенный способ, и конструкции ее механической части.

6. Разработка и создание экспериментального образца информационно-измерительной системы для подтверждения обоснованности теоретических расчетов и выводов результатами натурального активного эксперимента.

Методы исследования. Результаты исследований, включенные в диссертацию, базируются на анализе методов на основе магнитного неразрушающего контроля и их классификации, математическом аппарате преобразования Радона (ПР), методе компьютерной томографии, теоретических основах электротехники, вычислительном моделировании на ЭВМ с использованием пакетов прикладных программ Mathcad 14, LabVIEW.

Результаты исследования подтверждены натурным активным экспериментом.

Научная новизна работы. Получены следующие новые научные результаты:

1 Разработан новый способ магнитоиндукционного исследования (МИИ), основанный на последовательно-поступательных перемещениях и поворотах рабочего магнитоизмерительного органа и регистрации индуцируемых в нем напряжений, отличающийся тем, что процедура измерения дополнена алгоритмом радионовской реконструкции границ раздела сред посредством оценки дифференцированной тангенциальной составляющей линейных проекций плоскостных сумм перераспределенной плотности магнитного потока изначально однородного МП в результате его взаимодействия с ферромагнетиками, и позволяющий получать изображение границ пространственного расположения ферромагнитных тел внутри объектов, сохраняя их целостность в местах, недоступных для механического проникновения.

2 Разработан алгоритм способа магнитоиндукционного исследования, основанный на восстановлении изображения границ посредством преобразования Радона, отличающийся от томографического описания использованием общего случая преобразования и позволяющий снять ограничение требования понижения размерности задачи до двухмерной.

3 Предложены структура и конструкция информационно-измерительной системы, основанные на методе параллельного формирования исходных проекционных данных в виде плоскостных проекций потоков (линейных проекций плоскостных сумм), отличающиеся тем, что рабочий орган помимо томографического формирования дополнен зенитными наклонами, позволяющими реализовать предложенный способ МИИ с последующей визуализацией результатов процесса локализации границ раздела сред внутри объекта.

Практическая значимость. Разработан новый способ МИИ, позволяющий получать изображение границ пространственного расположения ферромагнитных

тел внутри объектов, в местах, недоступных для механического проникновения, посредством использования алгоритма обратной проекции с фильтрацией дифференцированной по заданному направлению оценки тангенциальной составляющей на границе раздела сред линейных проекций плоскостных сумм перераспределенной плотности магнитного потока изначально однородного МП в результате его взаимодействия с объектом. Оригинальность технического решения предложенного способа подтверждена патентом РФ № 2490659 от 20.08.2013.

На основе разработанных алгоритмов способа неразрушающего МИИ зарегистрированы программы (№ 2014613010, № 2014662872, № 2014662889, № 2014662890), представляющие собой интерактивный инструмент реконструкции с последующей визуализацией изображения пространственного расположения ферромагнитных тел внутри объектов.

Разработаны структура и конструкция информационно-измерительной системы, основанные на способе параллельного формирования исходных проекционных данных, позволяющие реализовать способ МИИ с последующей визуализацией результатов процесса локализации границ раздела сред внутри объекта. Оригинальность технического решения предложенного способа подтверждена патентом РФ № 2548405 от 20.04.2015.

Изготовлен экспериментальный образец информационно-измерительной системы, осуществляющий неразрушающее магнитоиндукционное исследование ферромагнитных компонентов внутри объектов и предназначенный для экспериментального подтверждения теоретических выводов и расчетов.

Результаты диссертационной работы использовались в НИР и НИОКР по темам «Мониторинг однородных и неоднородных магнитных полей для хрономаннитотерапии» (№ 4-12Г) и «Разработка и исследование измерительной системы для неразрушающей 3D магнитоскопии внутренней структуры ферромагнитных изделий» (№ 1563ГУ1/2014 от 03.03.2014).

Апробация результатов. Основные положения работы и результаты диссертационных исследований были представлены и получили одобрение на 17 международных и всероссийских научно-технических конференциях, в том числе на XXIII – XXX Всероссийских научно-технических конференциях «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы» (г. Рязань, 2010 – 2017), XVI – XVIII Всероссийских научно-технических конференциях «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (г. Рязань, 2011 – 2013), V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании» (г. Тюмень, 2012), Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 50-летию ТИИ-ТюмГНГУ «Новые технологии нефтегазовому региону» (г. Тюмень, 2013), II Международной научно-технической интернет-конференции «Информационные системы и технологии» (г. Орел, 2013), IV Международной научно-технической конференции «European Science and Technology» (г. Мюнхен, Германия, 2013), II и III Международных научно-практических конференциях «Современные проблемы науки и образования в техническом вузе» (г. Стерлитамак, 2015 и 2017), Всероссийской научно-технической конференции «Математические методы и информационные технологии управления в науке, образовании и правоохранитель-

ной сфере» (г. Рязань, 2017), а также на 4 региональных научно-технических конференциях, прошедших в г. Рязани в период с 2010 по 2018 годы.

Внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены в ОАО «Завод точного литья» (г. Рязань), а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Все внедрения и испытания подтверждены соответствующими актами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новый способ магнитоиндукционного исследования, реализующий реконструкцию границ раздела сред посредством оценки дифференцированной тангенциальной составляющей линейных проекций плоскостных сумм перераспределенной плотности магнитного потока, позволяющий получать изображение локализации границ пространственного расположения ферромагнитных тел внутри объектов, сохраняя их целостность в местах, недоступных для механического проникновения.

2. Алгоритм на основе способа магнитоиндукционного исследования, визуализирующий локализацию границ раздела сред внутри объекта, применяемый при их реконструкции посредством преобразования Радона, отличающийся от томографического описания использованием производной преобразования в общем (трехмерном) случае и позволяющий снять ограничение понижения размерности задачи до двухмерной.

3. Структура и конструкция информационно-измерительной системы, основанные на методе параллельного формирования исходных проекционных данных, отличающиеся тем, что рабочий орган помимо двумерного томографического формирования в полярных координатах дополнен зенитными наклонами сферических координат, позволяющими реализовать предложенный способ магнитоиндукционного исследования, при котором достигнуто значение относительной погрешности определения границ раздела сред 10 – 20 %.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 51 печатная работа, из них 12 статей в журналах из списка рекомендованных ВАК, 2 монографии (в соавторстве), получены 3 патента РФ на изобретение, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии на всех этапах в получении основных результатов диссертационного исследования, углубленном анализе отечественной и зарубежной литературы по теме выбранной проблематики, проведении вычислительного моделирования, разработке ИИС, реализующей способ МИИ, изготовлении ее экспериментального образца, на котором в ходе активных натуральных экспериментов проведены МИИ ферромагнитных внутренних включений, статистической обработке данных с описанием полученных результатов, написании и оформлении рукописи диссертации и значительного ряда публикаций по выполненной работе.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 106 наименований и 5 приложений. Диссертация содержит 196 страниц, в том числе 167 страниц основного текста, 73 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, проанализировано состояние проблемы, определены цель, задачи и объект исследования, раскрыты принципы используемых подходов и методик, показаны научная новизна и практическая значимость работы, приведены данные апробации результатов исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор работ по теме диссертации, а также приведен анализ известных методов и реализующих их технических средств на основе магнитного НК.

В соответствии с требованиями действующего ГОСТ 56542-2015 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов» составлена таблица методов на основе магнитного НК по способу получения первичной информации и раскрыта их физическая сущность.

Показано, что на сегодняшний день ни один из них не удовлетворяет всем требованиям, сформулированным в вводной части диссертации. Рассмотренные низкочастотные первичные преобразователи (датчики) в большинстве своем полнотелые, что предполагает наличие габаритных рабочих органов и исключает проникновение внутрь объекта. Единственный первичный преобразователь, который позволяет целиком поместить объект с ферромагнитными телами внутри себя без механического разрушения самого датчика, применяется в индукционном методе (пассивный индукционный преобразователь). Поэтому в диссертационном исследовании индукционный метод был выбран как наиболее приемлемый для последующего развития.

На основе известных технических средств систематизирована обобщенная схема НК индукционного метода, требующая обязательного наличия ползающей, позиционирующей, измерительной и визуализирующей систем с заданными критериями определения границ материалов.

Указано на необходимость использования метода компьютерной томографии (КТ), который базируется на частном случае ПР и представляет собой математический аппарат для получения изображения распределения физической величины в объеме. Как следует из его названия, КТ метод требует представить исследуемое трехмерное пространство объема с объектом внутри совокупностью сечений, благодаря чему размерность задачи понижается до двухмерной (томографической), что предполагает использование самого простого частного описания математического аппарата ПР, в котором интегрирование осуществляется по лучу и, как следствие, решается основное интегральное уравнение первого порядка. Возникающая при таком томографическом описании проблема реализации разрабатываемого способа заключается, во-первых, в том, что на практике измерение величины магнитной индукции (плотности потока) возможно только через процедуру регистрации магнитного потока, которая предполагает интегрирование по площади, а не по прямой, а во-вторых, в том, что КТ метод предполагает визуализацию скалярных распределений, тогда как магнитная индукция является распределением векторной величины.

Последним обстоятельством обусловлена необходимость отхода от частного описания математического аппарата ПР и использования его общего вида, доработанного под цель и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава диссертационной работы посвящена разработке способа на основе магнитного НК, позволяющего получать изображение границ пространственного расположения ферромагнитных включений и компонентов внутри объектов в местах, недоступных для механического проникновения.

Разработан и запатентован (патент № 2490659 от 20.08.2013) новый способ МИИ, основанный на индукционном методе определения дифференцированной по выбранному направлению оценки тангенциальной составляющей магнитной индукции \hat{B}_τ , дополненном алгоритмом реконструкции на основе обратной проекции с предварительной фильтрацией линейных проекций перераспределенной плотности магнитного потока изначально однородного МП в результате его взаимодействия с ферромагнитными телами.

В силу того, что предложенный способ является развитием индукционного метода, предполагается наличие двух катушек индуктивности – возбуждающей, являющейся источником излучения и в отсутствие объекта создающей вертикально ориентированное однородное в пространстве (x, y, z) и периодическое во времени t МП в точках исследуемого объема, а также измерительной, являющейся магниточувствительным рабочим органом. Последний представляет собой плоский контур с единичным вектором нормали $\bar{n} = (1, \theta, \alpha)$, который привязан к сферической системе координат, причем его размеры задаются такими, чтобы, независимо от его положения в исследуемом объеме, производная исходной векторной функции индукции поля $\bar{B}(x, y, z, t)$ достаточно быстро убывала к его границам (рисунок 1).

Использовано свойство взаимодействия МП с объектом, помещенным в исследуемый объем возбуждающей катушки, согласно которому на границах ферромагнитных включений и компонентов в зависимости от формы, структуры, а также пространственного расположения тел происходит резкое изменение тангенциальной составляющей плотности магнитного потока Φ изначально однородного МП, свидетельствующее о локализации этих тел.

Разработан алгоритм способа, начинающийся с процедуры управляемого пространственного перемещения магниточувствительного рабочего органа в объеме исследования (сканирования), которая соответствует прямому ПР для трехмерного пространства X, Y, Z :

$$\Phi(s, \bar{n}, t) = \int_{\Omega, s} \bar{B}(x, y, z, t) d\bar{\sigma},$$

где s – расстояние от начала системы координат (x, y, z) до текущего положения магниточувствительного рабочего органа в пространстве; Ω – часть плоскости с нормалью \bar{n} , ограниченная размерами плоского контура магниточувствительного рабочего органа, проходящая через точку с текущей координатой s (определяет

текущее положение), причем точки $(x, y, z) \in \Omega$; $d\vec{\sigma}$ – вектор к элементарной площадке плоскости Ω , определяемый как $d\vec{\sigma} = \vec{n} \cdot d\sigma$.

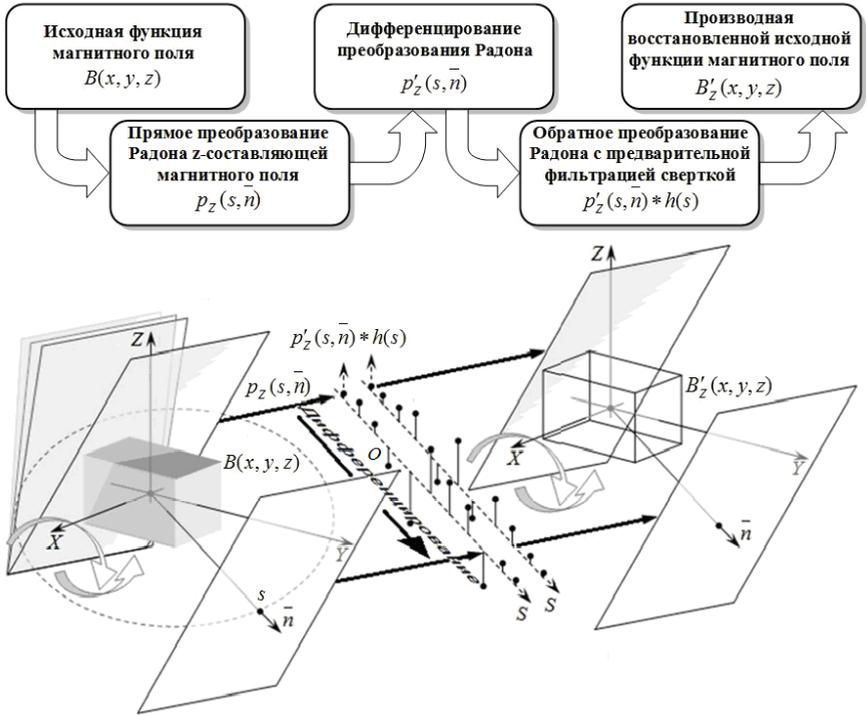


Рисунок 1 – Способ МИИ ферромагнитных тел внутри объектов

Изменение потока во времени отражается на амплитуде непрерывно индуцируемых в плоском контуре дифференциальных сигналов u вследствие действия закона электромагнитной индукции Фарадея:

$$u(s, \vec{n}, t) = - \frac{\partial \Phi(s, \vec{n}, t)}{\partial t}.$$

В ходе управляемого пространственного перемещения рабочего органа после каждого его дискретного передвижения вдоль оси OS для текущего значения переменной положения s под углами, определенными вектором нормали \vec{n} , вследствие действия закона электромагнитной индукции Фарадея регистрируется плоскостная проекция потока p в результате непрерывного интегрирования во времени t индуцируемых в плоском контуре дифференциальных сигналов u :

$$p(s, \vec{n}) = - \int_{kT}^{kT+t_0} u(s, \vec{n}, t) dt = \Phi(s, \vec{n}, t_0),$$

где T – период, в течение которого происходит одно полное изменение периодического сигнала u ; $k = 1, 2, \dots$ – номер периода; $t_0 = const$ – интервал времени от начала периода.

Таким образом, дискретные параллельные перемещения многократно повторяются под разными углами, задаваемыми зенитным θ и азимутальным α углами сферической системы координат, причем $0 \leq \theta < \pi$, а $0 \leq \alpha < 2\pi$, с получением необходимых для алгоритма реконструкции плоскостных проекций потока p .

Показано, что информативной величиной предложенного способа является резкое изменение тангенциальной составляющей плотности магнитного потока на границе раздела сред, прямо измерить которую не представляется возможным из-за отсутствия данных о местах локализации границ. Тангенциальная составляющая распределена между x, y, z -составляющими вектора магнитной индукции \vec{B} . Для вертикально ориентированного возбуждающего МП тангенциальная составляющая наибольшим образом присутствует в z -составляющей. Поэтому в качестве оценки тангенциальной составляющей выбрана z -составляющая плоскостных проекций потоков p_z , определяемая:

$$p_z(s, \vec{n}) = p(s, \vec{n}) \cos \theta.$$

Локализованы границы раздела сред с разными значениями магнитной проницаемости, на которых тангенциальная составляющая вектора магнитной индукции $B_z(x, y, z)$ резко изменяется (претерпевает скачки). Локализация осуществлена посредством дифференцирования по переменной s значений z -составляющей плоскостных проекций потоков $p'_z(s, \vec{n})$ с выбранным углом наблюдения β :

$$p'_z(s, \vec{n}) = \cos(\alpha - \beta) \cdot \frac{\partial p_z(s, \vec{n})}{\partial s},$$

где $\cos(\alpha - \beta)$ – коэффициент, определяющий направление дифференцирования, причем $0 \leq \beta < \pi$.

Кроме того, введение операции дифференцирования z -составляющей плоскостных проекций потоков обусловлено необходимостью представления исходных проекционных данных в виде, удовлетворяющем требованиям применения к ним алгоритма реконструкции.

Алгоритм реконструкции основан на обратном ПР по принципу обратной проекции с предварительной фильтрацией сверткой p' с фильтрующей функцией $h(s)$:

$$\tilde{p}'_z(s, \vec{n}) = p'_z(s, \vec{n}) * h(s),$$

где символ «*» есть оператор свертки.

Оценка тангенциальной составляющей продифференцированной функции потока магнитной индукции $B'_z(x, y, z)$ определяется:

$$B'_z(x, y, z) = \int \tilde{p}'_z(s, \vec{n}) d\vec{n},$$

где $s = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, а $\int d\bar{n} = \int \int d\alpha \sin \theta d\theta$.

Таким образом:

$$\hat{B}'_{\tau}(x, y, z) = B'_z(x, y, z) = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \tilde{p}'_z(s, \theta, \alpha) d\alpha \sin \theta d\theta.$$

Отличительной особенностью данной реализации по сравнению с классическим методом КТ является то, что, во-первых, исходная сканируемая функция плотности потока \bar{B} имеет трехмерную векторную природу, во-вторых, сканирование (получение исходных проекционных данных) осуществляется интегрированием по плоскости, а не по прямой и, в-третьих, зоны неоднородности исходной функции МП выявляются дополнительно введенной процедурой дифференцирования. Все это позволяет исключить механическое проникновение внутрь объекта исследования и ограничивается регистрацией исходных проекционных данных с последующей их математической обработкой.

При реализации способа МИИ обоснована возможность использования квазистационарной модели описания электромагнитного поля, допускающей описание переменной магнитной составляющей уравнениями статического поля, и учтены ограничения, требующие минимизации присутствия поверхностного эффекта («скин-эффекта»), в предположении работы на достаточно низких частотах.

По данным анализа методических погрешностей предложенного способа указана природа возможных искажений его результатов, что позволило сформулировать подходы к их коррекции.

Третья глава диссертационной работы посвящена разработке программного обеспечения алгоритма и проверке корректности и работоспособности предложенного математического аппарата посредством вычислительного моделирования на образцах простой геометрической формы.

Разработан алгоритм на основе способа МИИ, предложена его блок-схема и посредством среды графического программирования LabVIEW разработано программное обеспечение, необходимое для реализации способа МИИ, на которое получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014662872.

Алгоритм на основе способа МИИ ферромагнитных тел внутри объектов включает:

Шаг 1. Регистрация исходных проекционных данных в виде линейных проекций плоскостных сумм $p(s, \theta, \alpha)$ плотности потока $B(x, y, z)$.

Шаг 2. Расчет z -составляющей линейных проекций плоскостных сумм $p_z(s, \theta, \alpha)$.

Шаг 3. Дифференцирование по выбранному направлению z -составляющей линейных проекций плоскостных сумм $p'_z(s, \theta, \alpha)$.

Шаг 4. Фильтрация дифференцированной z -составляющей линейных проекций плоскостных сумм $\tilde{p}'_z(s, \bar{n})$.

Шаг 5. Реконструкция изображения границ раздела сред посредством анализа оценки $\hat{B}'_{\tau}(x, y, z)$, восстановленного методом обратной проекции с предвари-

тельно фильтрованной дифференцированной z -составляющей линейных проекций плоскостных сумм.

Конец алгоритма.

Предложена модель образцового ферромагнитного включения в виде цельнометаллического и полого шаров (усложненная форма образца) и проведены аналитические расчеты процедуры их намагничивания. Требование изменения геометрии модели полого шара наличием внутренних границ раздела сред в сравнении с цельнометаллическим шаром обусловлено потребностью исследования адекватности предложенного способа МИИ при локализации границ различных ферромагнитных тел внутри объектов, а также определения его разрешающей способности. Выявлено, что при внутреннем радиусе включения, равном нулю, расчет намагниченности полого шара согласуется с расчетом намагниченности цельнометаллического шара, что косвенно подтверждает правильность расчетов последнего образца.

Предложены алгоритмы расчета и моделирования распределения МП намагниченного цельнометаллического и полого шаров, представлена их блок-схема и разработано необходимое для ее реализации программное обеспечение в среде LabVIEW 9.0, на которое получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014662889. Корректность алгоритма и программы проиллюстрирована изображением пространственных распределений МП (рисунок 2).

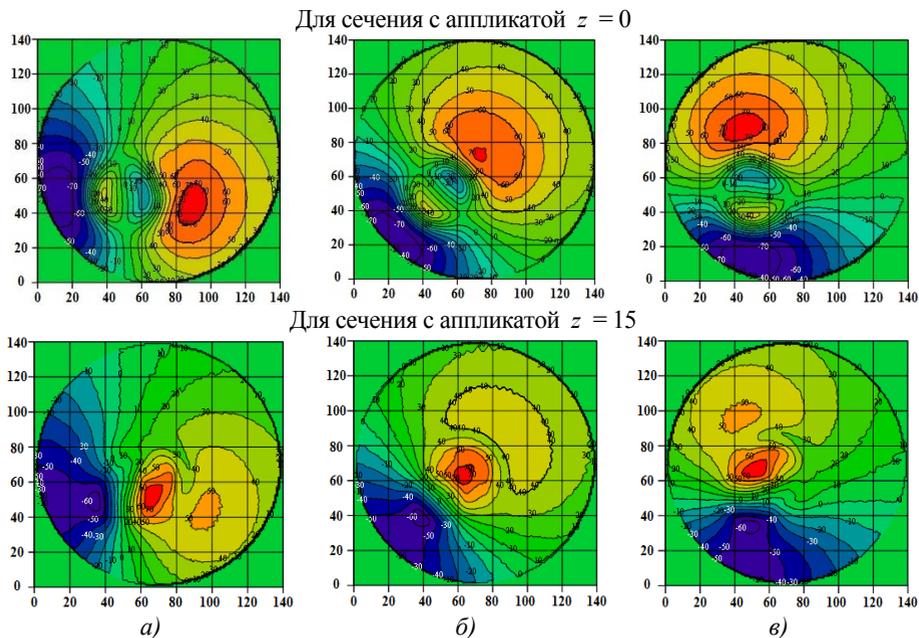


Рисунок 2 – Результаты реконструкции границы цельнометаллического включения в плоскости для различных углов наблюдения β : а – 0; б – $\pi/4$; в – $\pi/2$

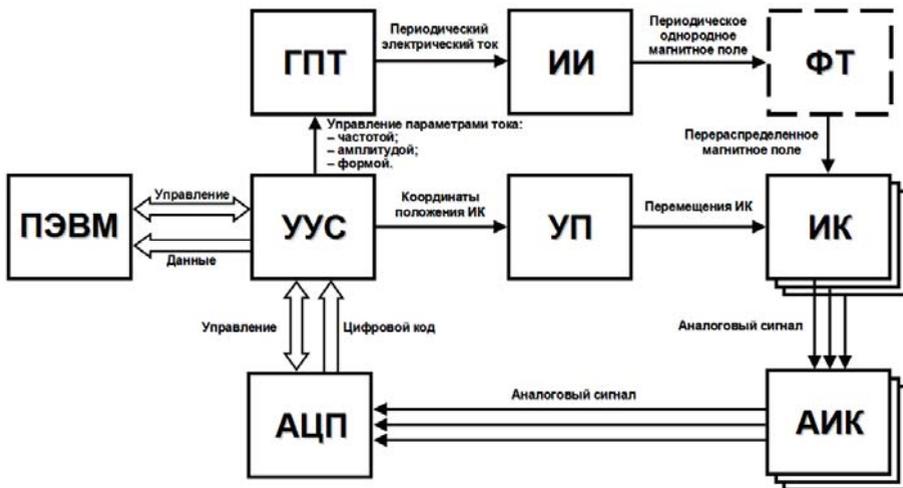
Предложен алгоритм моделирования процедуры получения линейных проекций плоскостных сумм аналитически рассчитанного распределения МП намагниченного полого шара. Процедура пространственного сканирования распределения основана на параллельном способе формирования массива проекционных данных плоскостных сумм метода КТ, дополненного зенитными наклонами. Представлена блок-схема предложенного алгоритма.

Разработано необходимое для ее реализации программное обеспечение в среде LabVIEW 9.0, на которое получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014662890. Выполнено моделирование МИИ рассчитанного распределения, по результатам которого определены локализация границ смещения и геометрическая форма образцового цельнометаллического включения. Результаты реконструкции границы в плоскости для различных углов наблюдения β представлены на рисунке 2.

Проведен сравнительный анализ соответствия геометрии образцового включения, полученной в результате применения способа МИИ, исходной геометрии. Относительная погрешность внешних и внутренних границ образца не превысила 10%.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена практической реализации способа МИИ ферромагнитных тел внутри объектов и практическому подтверждению результатов теоретических исследований посредством созданного экспериментального образца системы МИИ.

Разработана структура ИИС, реализующая предложенный способ МИИ, представленная на рисунке 3. Описаны реализуемые в ней процессы.



Рисунке 3 – Структура ИИС магнитоиндукционного исследования ферромагнитных тел внутри объектов

Предложена структура ИИС, позволяющая получать изображения локализации границ пространственного расположения ферромагнитных тел (ФТ) внутри объектов, которая включает генератор периодического тока (ГПТ), источник излу-

чения однородного магнитного поля (ИИ), измерительные контуры (ИК), аналоговые измерительные каналы (АИК), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), устройство позиционирования измерительного контура (УП), устройство управления-сопряжения (УУС) и персональную электронно-вычислительную машину (ПЭВМ).

Проведено макетирование предложенного способа МИИ ферромагнитных тел внутри объектов. Создан, отлажен и исследован экспериментальный образец (рисунок 4), включающий ГПТ, ИИ однородного МП, ИК, АИК, АЦП и ПЭВМ.

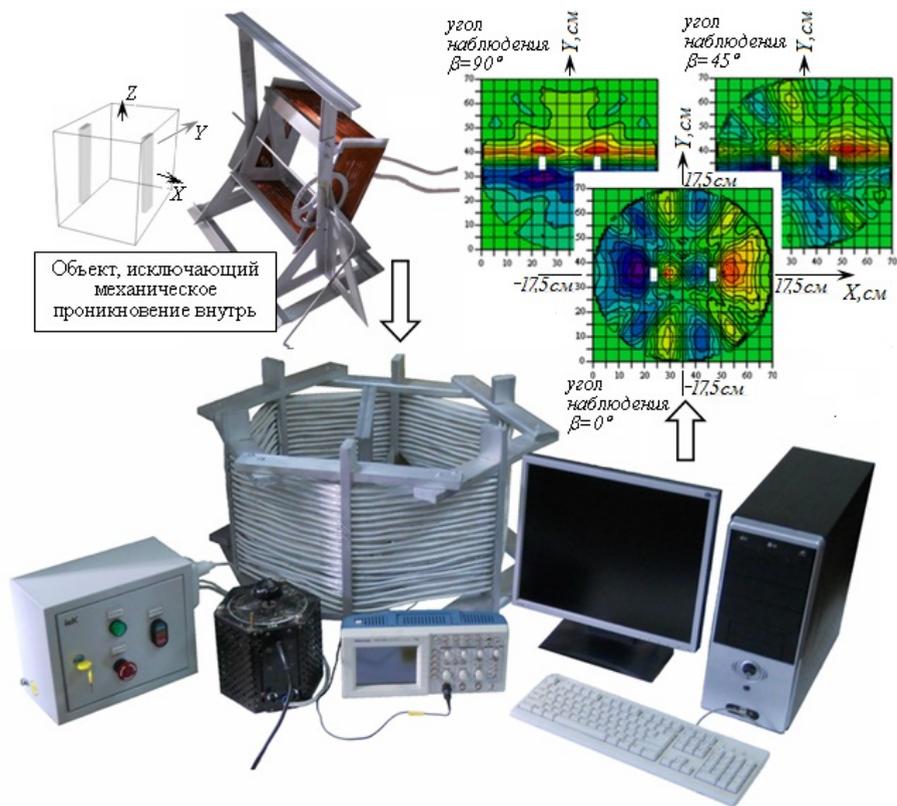


Рисунок 4 – Экспериментальный образец, реализующий способ МИИ ферромагнитных тел внутри объектов

Выявлено, что проблемой реализации способа МИИ является точность регистрации слабого полезного сигнала неравноточными каналами системы вследствие имеющегося разброса в габаритных размерах измерительных катушек, качества намотки и инструментальных погрешностей. Для решения проблемы предложено альтернативное многоканальной системе представление в виде одноканальной системы, дополненной помимо угловых поворотов еще и линейными перемеще-

ниями. Благодаря этому расширены возможности конструкции; для проведения прецизионных измерений и повышения разрешающей способности изготовлены макет одноканального ИК, а также УП.

В рамках решения вопроса эффективной организации измерительного процесса при реконструкции изображения границ пространственного расположения ферромагнитных включений и компонентов внутри объектов предложено и запатентовано (патент № 2548405 от 20.04.2015) оригинальное решение конструкции механической части.

В ходе активных натуральных экспериментов проведены МИИ ферромагнитных включений простой геометрической формы, расположенных внутри объектов. Посредством экспериментального образца ИИС и разработанной программной реализации получены изображения оценки локализации границ пространственного расположения. На изображениях максимумы восстановленной функции свидетельствуют о наличии в окрестностях границы перехода из воздушной среды в среду ферромагнетика, а последующий минимум – об обратном переходе. Имеющиеся замкнутые и незамкнутые границы области являются мнимыми границами, появившимися вследствие ложных (фантомных) проявлений в численных реализациях обратного ПР. В частности, изображения границ под разными углами наблюдения β для двух ферромагнитных стержней, расположенных вертикально внутри объекта, исключающего механическое проникновение, представлены на рисунке 4.

На основании проведенных исследований расширены функциональные возможности магнитного НК, решена научная проблема оценки локализации границ пространственного расположения ферромагнитных тел внутри объектов в местах, недоступных для механического проникновения, посредством предложенной в работе ИИС МИИ.

В заключении приведены основные научные и практические выводы, сделанные по результатам работы.

1. Проанализированы известные методы и реализующие их технические средства на основе магнитного НК. Показано, что из-за недостатков первичных преобразователей, исключающих проникновение внутрь объекта, ни один из методов на основе магнитного НК не удовлетворяет полностью всем требованиям, сформулированным в вводной части диссертационного исследования. Выявлено, что при разработке нового способа дальнейшее развитие получил наиболее приемлемый индукционный метод НК.

2. Предложен новый способ магнитоиндукционного исследования, позволяющий получать изображение границ пространственного расположения ферромагнитных тел внутри объектов в местах, недоступных для механического проникновения, посредством использования алгоритма реконструкции на основе обратной проекции с фильтрацией дифференцированной по заданному направлению оценки тангенциальной составляющей на границе раздела сред линейных проекций плоскостных сумм перераспределенной плотности магнитного потока изначально однородного магнитного поля в результате его взаимодействия с объектом.

Научная новизна предложенного способа подтверждена патентом РФ № 2490659 от 20.08.2013.

3. Разработан алгоритм на основе способа МИИ, визуализирующего локализацию границ раздела сред внутри объекта, применяемого при их реконструкции

посредством преобразования Радона, отличающийся от томографического описания использованием производной преобразования в общем (трехмерном) случае и позволяющий снять ограничение требования понижения размерности задачи до двухмерной.

Предложен алгоритм расчета и моделирования распределения магнитного поля намагниченных образцов простой геометрической формы.

Предложен алгоритм моделирования процедуры получения линейных проекций плоскостных сумм.

На основе предложенных алгоритмов разработаны программы, на которые получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (№ 2014613010, № 2014662872, № 2014662889, № 2014662890).

4. Разработана структура ИИС, реализующая предложенный способ МИИ.

В рамках решения вопроса эффективной организации измерительного процесса при реконструкции изображения границ пространственного расположения ферромагнитных включений и компонентов внутри объектов предложено оригинальное решение конструкции механической части разработанной системы, подтвержденное патентом РФ № 2548405 от 20.04.2015.

5. Разработан экспериментальный образец ИИС, реализующий способ МИИ ферромагнитных тел внутри объектов. Представлены два решения устройства магниточувствительного рабочего органа: для проведения прецизионных измерений и повышения разрешающей способности в виде одноканального измерительного контура, а также в виде многоканальной системы (состоящей из 40 плоских измерительных контуров), повышающей скорость проводимых исследований.

6. В ходе активных натуральных экспериментов проведены экспериментальные магнитоиндукционные исследования ферромагнитных включений, расположенных внутри объектов. Результатами МИИ подтверждена обоснованность теоретических выводов и расчетов. Для реконструированных изображений выбранных образцов достигнуто значение относительной погрешности определения границ раздела сред, вызванной формой, структурой, а также пространственным расположением ферромагнетиков внутри объектов, 10 – 20 %.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Получение изображения распределения магнитного поля внутри биологических объектов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2011. – № 7. – С. 41–46.

2. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Теоретический расчет и анализ распределения магнитного поля равномерно намагниченного шара во внешнем однородном магнитном поле // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2012. – вып. 40, № 2. – С. 25–29.

3. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Концептуальная модель способа неразрушающего измерения магнитных полей внутри биологических объектов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2012. – № 7. – С. 37–43.

4. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Имитационная модель способа неразрушающего измерения магнитных полей // Нелинейный мир. – 2012. – № 12. – С. 924–931.

5. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Неразрушающая регистрация распределения плотности магнитного потока внутри биологических объектов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2013. – № 7. – С. 26–31.

6. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Вычислительное моделирование процедуры применения способа магнитоиндукционного исследования для анализа формы скрытых магнитных инородных включений внутри биологических объектов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2014. – № 7. – С. 33–43.

7. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Моделирование способа неразрушающего магнитоиндукционного исследования для получения изображения геометрии внутренней структуры ферромагнитных изделий // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2014. – вып. 50, № 4. – Ч. II. – С. 47–50.

8. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Разработка и физическое обоснование реализации информационно-измерительной системы магнитоиндукционного исследования биологических объектов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2015. – № 5. – С. 14–20.

9. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Практическая реализация системы неинвазивного магнитоиндукционного исследования биологических объектов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2016. – № 6. – С. 27–37.

10. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Оценка разрешающей способности системы неинвазивного магнитоиндукционного исследования ферромагнитных включений биологических объектов для ограниченного числа измерений // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2017. – № 7. – С. 20–29.

11. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Методические погрешности способа неинвазивного магнитоиндукционного исследования // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2017. – № 7. – С. 30–36.

12. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Квазистационарная модель описания магнитного поля при реализации способа магнитоиндукционного исследования ферромагнитных тел внутри объектов // Инженерная физика. – 2017. – № 9. – С. 33–39.

Патенты РФ:

1. Пат. № 2463620 РФ, МПК G01R33/02. Способ измерения распределения векторной функции магнитной индукции периодического магнитного поля / А.А. Жильников, Т.А. Жильников, В.И. Жулев. – Оpubл. 10.10.2012.

2. Пат. № 2490659 РФ, МПК G01R33/00. Способ неразрушающего объемного измерения векторной функции магнитной индукции неоднородно распределенного в пространстве и периодически изменяющегося во времени магнитного поля / А.А. Жильников, Т.А. Жильников, В.И. Жулев. – Оpubл. 20.08.2013.

3. Пат. № 2548405 РФ, МКП G01N27/83. Устройство для неразрушающей дифференциальной векторной трехмерной магнитоскопии / А.А. Жильников, Т.А. Жильников, В.И. Жулев, М.Б. Каплан. – Оpubл. 20.04.2015.

4. Свидетельство № 2014613010 о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программа моделирования неоднородных магнитных полей / М.Б. Каплан, А.А. Жильников, А.П. Давыдов ; Ряз. гос. радиотехн. ун. – Оpubл. 14.03.2014.

5. Свидетельство № 2014662889 о государственной регистрации программ для ЭВМ. Расчет и моделирование распределения магнитного поля намагниченного цельнометаллического и полого шаров в сферической системе координат / А.А. Жильников, Т.А. Жильников, В.И. Жулев, М.Б. Каплан ; Ряз. гос. радиотехн. ун. – Оpubл. 10.12.2014.

6. Свидетельство № 2014662890 о государственной регистрации программ для ЭВМ. Моделирование процедуры получения линейных проекций плоскостных сумм аналитически рассчитанного смещенного распределения магнитного поля намагниченного полого шара / А.А. Жильников, Т.А. Жильников, В.И. Жулев, М.Б. Каплан ; Ряз. гос. радиотехн. ун. – Оpubл. 10.12.2014.

7. Свидетельство № 2014662872 о государственной регистрации программ для ЭВМ. Способ неразрушающего магнитоиндукционного исследования, позволяющего получать изображение геометрии внутренней структуры ферромагнитных изделий / А.А. Жильников, Т.А. Жильников, В.И. Жулев, М.Б. Каплан ; Ряз. гос. радиотехн. ун. – Оpubл. 10.12.2014.

Монографии:

1. Борисов А.Г., Гостев С.С., Григорьев Е.В., Гуржин С.Г., Жильников А.А. [и др.]. Комплексная хрономаннитотерапия: методы и средства повышения эффективности : моногр. / под ред. А.Г. Борисова, С.Г. Гуржина. – М. : Радиотехника, 2012. – 176 с.
2. Абрамов А.М., Борисов А.Г., Григорьев Е.М., Гуржин С.Г., Дунаев А.А., Жильников А.А. [и др.]. Комплексная хрономаннитотерапия: методы и средства биоадаптации воздействия : моногр. / под ред. С.Г. Гуржина, Е.М. Прошина. – М. : Радиотехника, 2015. – 212 с.

Публикации в других изданиях:

1. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Способ неразрушающего измерения распределения векторной функции индукции магнитного поля внутри намагничиваемых плотноупакованных гранулированных сред // Информационно-измерительная и биомедицинская техника: сб. науч. тр. – Рязань : РГРТУ, 2011. – С. 12–23.
2. Жильников А.А. Способ неразрушающей объемной регистрации магнитных полей в магнитотерапии // Материалы докл. XXIV Всерос. науч.-техн. конф. «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. Биомедсистемы – 2011». – Рязань : РГРТУ, 2011. – Ч. 2. – С. 150–152.
3. Жильников А.А. Неразрушающие измерения магнитных полей внутри биологических объектов // Материалы докл. XXV Всерос. науч.-техн. конф. «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. Биомедсистемы – 2012». – Рязань : РГРТУ, 2012. – С. 224–227.
4. Жильников А.А. Измерительная система неразрушающей 3D магнитоскопии // Материалы докл. регион. конф. молодых ученых «Инновационные методы решения научных и технологических задач Рязанской области». – Рязань : РГРТУ, 2013. – С. 3–7.
5. Жильников А.А. Автоматизированная измерительная система неразрушающей дифференциальной векторной 3D магнитоскопии // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. посвященной 50-летию ТИИ-ТюмГНГУ «Новые технологии нефтегазовому региону» – Тюмень : ТюмГНГУ, 2013. – Т. II. – С. 297–300.
6. Жильников А.А. Измерительная система для неразрушающей 3D магнитоскопии внутренней структуры ферромагнитных изделий // Материалы докл. регион. конф. молодых ученых «Пути инновационного развития экономики Рязанской области». – Рязань : РГРТУ, 2013. – С. 55–59.
7. Жильников А.А. Программа моделирования способа неразрушающего магнитоиндукционного исследования для получения изображения геометрии внутренней структуры ферромагнитных изделий внутри биологических объектов // Материалы докладов XXVII Всерос. науч.-техн. конф. «Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы. Биомедсистемы – 2014». – Рязань : РГРТУ, 2014. – С. 101–104.
8. Zhilnikov A.A., Zhulev V.I., Kaplan M.B. Technique of modelling magnetic field of field formed system of magnetotherapy device // Materials of the IV International research and practice conference «European Science and Technology» / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg. – Munich. - Germany, 2013. – Vol. I. – pp. 396–397.

Соискатель



А.А. Жильников

ЖИЛЬНИКОВ Артем Александрович

**СПОСОБ И АЛГОРИТМЫ МАГНИТОИНДУКЦИОННОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛ ВНУТРИ ОБЪЕКТОВ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук