

На правах рукописи

МИХАЙЛОВ Алексей Вадимович



**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ СКАНИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОЙ
ДЕФЕКТОСКОПИИ ДЛИННОМЕРНЫХ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ
С БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ**

Специальность: 05.11.13 – приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель – **Сморodinский Яков Гаврилович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Дымкин Григорий Яковлевич
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Методы и приборы неразрушающего контроля», заведующий кафедрой

Платунов Андрей Валерьевич
кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», заведующий лабораторией экзаменационного центра по неразрушающему контролю

Ведущая организация – **Общество с ограниченной ответственностью «Акустические Контрольные Системы»**

Защита диссертации состоится 17 мая 2019 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 15 марта 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Электромагнитно-акустический (ЭМА) метод допускает наличие воздушного зазора между преобразователем и поверхностью объекта контроля в отличие от метода ультразвукового контроля (УЗК) с применением пьезопреобразователей, чувствительность которого в большой степени зависит от качества и стабильности акустического контакта. Из этого следуют основные преимущества бесконтактного ЭМА метода: возможность скоростного сканирования протяженных объектов и объектов с большой площадью поверхности, экстремально холодных или горячих объектов, а также объектов с неподготовленной (загрязнённой) поверхностью, независимость результатов контроля от качества акустического контакта, в идеале отсутствие износа ЭМА преобразователей.

Основное ограничение ЭМА метода заключается в малой эффективности взаимного преобразования электромагнитных и акустических волн, а значит, и меньшая, по сравнению с контактными УЗК, чувствительность к дефектам. При этом под эффективностью понимается полученное в результате двойного ЭМА преобразования (излучение-приём) отношение сигнал/шум. Низкая эффективность двойного ЭМА преобразования особенно ярко проявляется при сканирующей диагностике ферромагнитных объектов с большой (более 15 мм) толщиной стенки, например, магистральных нефте- и газопроводов, листового проката, корпусов судов и цистерн. Это связано с растеканием магнитного потока по объёму массивного ферромагнитного объекта и соответствующим уменьшением амплитуды возбуждаемой электромагнитной волны. Для контроля упомянутых объектов целесообразно использовать так называемый волноводный способ.

Анализ имеющихся разработок показывает, что повышение эффективности ЭМА преобразования может быть получено как за счёт оптимизации намагничивающей системы ЭМА преобразователя и применения новых методик генерации ультразвуковых (УЗ) волн, так и за счёт определения и использования мод ультразвуковых колебаний с наименьшими значениями затухания и дис-

персии. Для решения первого вопроса актуальным является теоретическое и экспериментальное исследование локального бесконтактного намагничивания массивных ферромагнитных объектов постоянным или импульсным поляризирующим магнитным полем, а также исследование магнестрикционного механизма возбуждения УЗ колебаний. Для решения второго вопроса требуются экспериментальные исследования распространения УЗ колебаний различных мод в протяжённых объектах с большой толщиной стенки.

Актуальность диссертационной работы подтверждается актом внедрения, а также тем, что тема исследований соответствует пункту 8 приоритетных направлений развития науки, технологий и техники, а также пункту 21 перечня критических технологий Российской Федерации в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 16.12.2015 г. N 623.

Исследования были выполнены в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Диагностика», № 01201463329), государственных проектов: программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Математическое и физическое моделирование неоднородных электромагнитных полей и разработка многоцелевых программно-аппаратных систем контроля с использованием бесконтактных методов измерений» (проект № 12-П-2-1031), программы молодежных инновационных проектов УрО РАН «Модельная и экспериментальная оптимизация подмагничивающей системы ЭМА преобразователя с ортогональным намагничиванием» (проект № 13-2-ИП-642).

Степень разработанности темы исследования. До проведения исследований по теме диссертации при недостаточной чувствительности ЭМА преобразователей при сканирующем контроле длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки (труб магистральных нефте- и газопроводов) использовались массивные намагничивающие системы массой до 100 кг, сложные усилители и фильтры электрического сигнала. В рамках настоящего исследования получены расчётные модели намагничивающих систем для создания сильных магнитных полей в материале ферромагнитного изделия любой толщины как для случая ортогонального,

так и параллельного поверхности ферромагнетика подмагничивания. Была разработана методика бесконтактного возбуждения ультразвуковых волн магнито-стрикционным преобразователем без применения поляризующего поля, основанная на чётности эффекта магнито-стрикции.

При волноводном контроле длинномерных ферромагнитных объектов доступ к торцевой поверхности объекта контроля отсутствует, поэтому, как правило, использовались моды волн Лэмба: $SV1$ и $SV2$. Эти моды обладают высокой дисперсией и при толщине ферромагнетика более 12 мм возбуждаются неэффективно. В данной работе было определено, что волна Рэлея и квази-Рэлея волна в наибольшей степени подходят для контроля длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки.

Результаты исследования послужили основой для конструирования реальных малогабаритных ЭМА преобразователей с увеличенной чувствительностью к дефектам, достигнутой за счёт увеличения эффективности ЭМА преобразования и оптимизации геометрических размеров намагничивающих систем.

Цели и задачи диссертационной работы. Целью работы является разработка новых высокоэффективных и малогабаритных электромагнитно-акустических преобразователей для бесконтактной сканирующей ультразвуковой диагностики длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

а) определение оптимальных мод ультразвуковых волн, которые позволят повысить чувствительность ЭМА метода при сканирующем контроле длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки, разработка конструкции и оптимизация геометрических параметров однонаправленных первичных ЭМА преобразователей, позволяющих излучать и принимать ультразвуковые волны только с одной стороны для исключения неоднозначности при волноводном контроле;

б) модельные и экспериментальные исследования пространственного распределения магнитного поля и магнитного потока

от намагничивающих систем ЭМА преобразователей различной конфигурации:

- типовых намагничивающих систем, состоящих из постоянных магнитов;

- намагничивающих систем из постоянных магнитов с ортогональным к поверхности (электродинамический механизм ЭМА преобразования) и параллельным поверхности объекта контроля (магнитострикционный механизм ЭМА преобразования) поляризирующим полем;

в) разработка и экспериментальные исследования импульсной П-образной намагничивающей системы с параллельным поляризирующим полем для магнитострикционного механизма ЭМА преобразования;

г) теоретические и экспериментальные исследования бесконтактного магнитострикционного возбуждения ультразвуковых волн в ферромагнетике без применения поляризирующего поля.

Научная новизна.

Научная новизна полученных в диссертации результатов может быть сформулирована в виде следующих положений:

1) установлено, что для контроля длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки в наибольшей степени подходят волны Рэлея и квазиРэлеевские волны, так как они обладают малой дисперсией и затуханием, то есть хорошо возбуждаются и принимаются на большом интервале толщин объектов контроля без необходимости замены первичного ЭМА преобразователя. Показано, что с помощью вложенных друг в друга катушек в форме меандра возможны однонаправленное излучение и приём ультразвуковых волн ЭМА методом;

2) показано, что применяемые на сегодняшний день типовые схемы намагничивающих систем из постоянных магнитов не могут обеспечить оптимальные для эффективного ЭМА преобразования магнитные характеристики поляризирующего поля (магнитная индукция $B_n > 1,2$ Тл для электродинамического механизма, напряжённость магнитного поля $H\tau \sim 300$ А/см для магнитострикционного

механизма) при контроле длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки;

3) определено, что для создания оптимального для эффективного ЭМА преобразования поляризующего поля, направленного ортогонально к поверхности ферромагнетика с большой толщиной стенки, следует применять намагничивающие системы, построенные по принципу неколлинеарного расположения постоянных магнитов. Установлено, что даже при малой массе такой намагничивающей системы (~ 3 кг), магнитная индукция во всей рабочей зоне намагничивающей системы превышает 2 Тл;

4) получены математические выражения для расчёта геометрических и электрических параметров импульсного П-образного электромагнита, создающего оптимальное для эффективного ЭМА преобразования параллельное поляризующее поле. Приведён пример расчёта импульсного электромагнита для случая ферромагнитной пластины толщиной 16 мм и установлено, что для такого случая магнитодвижущая сила (произведение числа витков катушки на протекающий по ней ток) в катушке импульсного электромагнита должна составлять порядка 3000 ампер-витков;

5) показана возможность высокоэффективного магнитострикционного возбуждения волн Релея и Лэмба в ферромагнетиках без использования поляризующего поля.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные в работе результаты моделирования пространственного распределения магнитных поля и потока от намагничивающих систем расширяют представления о характере локального намагничивания ферромагнетиков с большой толщиной стенки.

Применение однонаправленных первичных ЭМА преобразователей, волн Рэлея и квази-релеевских волн, оптимизированных намагничивающих систем, а также способ магнитострикционного возбуждения ультразвуковых волн в ферромагнетиках без использования поляризующего поля помогают существенно увеличить эффективность ЭМА преобразования, а значит, и чувствительность ЭМА метода к дефектам при сканирующем контроле длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки.

Разработанные намагничивающие системы могут применяться в составе высокоэффективных ЭМА преобразователей при сканировании основного материала толстостенного длинномерного ферромагнитного объекта, а также для ЭМА толщинометрии.

Разработанный на основе полученных результатов оптимизированный ЭМА преобразователь с постоянным ортогональным к поверхности объекта контроля поляризующим полем был использован АО «НПО «Интротест» при разработке сканера-дефектоскопа ЭМА-МГТУ-2, о чём свидетельствует акт внедрения.

Получен патент на полезную модель сканирующего дефектоскопа, в котором используется разработанная намагничивающая система.

Методология и методы исследования. При выборе мод ультразвуковых волн, параметров первичных ЭМА преобразователей и при исследовании возбуждения ультразвуковых волн ЭМА методом без использования поляризующего поля использовалась методология ультразвукового неразрушающего контроля: контактного и бесконтактного (ЭМА). При исследовании особенностей намагничивания длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки была использована методология цифрового моделирования пространственного распределения магнитных полей и потоков внутри и вблизи поверхности намагничиваемых объектов. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием цифровых технологий управления измерениями, сбора и анализа экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование однонаправленных первичных ЭМА преобразователей, волны Рэлея и квазирэлеевских волн при неразрушающем контроле сплошности ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки волноводным способом позволяет увеличить чувствительность ЭМА преобразователей, а также исключить неопределённость измерения координат дефектов.

2. Неразрушающий контроль сплошности ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки ЭМА методом следует производить с помощью преобразователей, содержащих намагничиваю-

щие системы с неколлинеарным расположением постоянных магнитов, импульсные намагничивающие системы, либо системы, не требующие поляризующего поля.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается их устойчивой воспроизводимостью, использованием аттестованных измерительных приборов и экспериментальных установок, аттестованных методик измерений и методов обработки экспериментальных данных. Достоверность также подтверждается согласованностью промежуточных результатов с результатами других авторов. Выводы, сделанные в диссертации, логически следуют из результатов модельных и экспериментальных исследований и не противоречат современным научным представлениям.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах: 7-ом Всероссийском научно-техническом семинаре «Метрологическое обеспечение в области неразрушающего контроля качества» (г. Москва, 2010 г.), первой международной научной конференции «Наноструктурные материалы – 2008: Беларусь – Россия – Украина (НАНО – 2008)» (г. Минск), X, XI и XIII Всероссийских школах-семинарах по проблемам физики конденсированного состояния вещества (г. Екатеринбург, 2009 г., 2010 г., 2011 г.), Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля» (г. Екатеринбург, 2011 г., 2014 г.), научном семинаре «Бесконтактное возбуждение и приём ультразвука в металлах и практические аспекты их использования в неразрушающем контроле» (г. Екатеринбург, 2010 г.), научной сессии Института физики металлов УрО РАН по итогам 2012 и 2014 гг. (г. Екатеринбург, 2013 г., 2015 г.), III Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Измерения, контроль и диагностика – 2014» (г. Ижевск, 2014 г.), XIII и XIX Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» (г. Екатеринбург, 2015 г., 2016 г.).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 5 печатных работах и 10 тезисах докладов, из них: 4 статьи

в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ и WoS [1-4], 1 патент на полезную модель [5], 3 статьи в сборниках трудов конференций.

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором. Постановка задач проводилась автором совместно с научным руководителем. Автором проведено компьютерное моделирование пространственного распределения магнитных полей и магнитного потока от намагничивающих систем различной конфигурации внутри и около поверхности длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки. А.В. Михайловым получены теоретические и экспериментальные данные, выполнена статистическая обработка, проведён анализ полученных данных с целью разработки новых оптимизированных намагничивающих систем с ортогональным и параллельным поверхностям объекта контроля поляризующими полями для высокоэффективных ЭМА преобразователей. Автором проведены экспериментальные исследования эффективности применения волн Рэлея и квазирэлеевских волн при контроле длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки волноводным ЭМА эхо-методом УЗК. Автором была выявлена возможность и разработана методика бесконтактного магнитострикционного излучения ультразвуковых волн без использования поляризующего поля. Результаты исследований неоднократно докладывались диссертантом на всероссийских и международных конференциях. Вместе с руководителем автор принимал участие в обсуждении результатов исследований, написании статей по выполненной работе и написании заявок на патенты РФ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы, состоящего из 88 наименований, и 7 приложений. Общий объём

диссертации составляет 141 страницу, в том числе 47 рисунков и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована её актуальность, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе обсуждаются экспериментальные и теоретические аспекты возбуждения и приёма ультразвуковых волн ЭМА способом, основы волноводного ЭМА эхо-метода УЗК. Приводятся типовые конструкции ЭМА преобразователей, основы численного компьютерного моделирования магнитных систем. Представлен обзор существующих средств, которые возможно применять в настоящее время для сканирования длинномерных ферромагнитных объектов волноводным ЭМА методом. Обсуждаются основные ограничения ЭМА способа в случае контроля ферромагнетиков с большой толщиной стенки. Сделан вывод об актуальности задачи разработки ЭМА преобразователей для эхо-метода УЗК, обладающих низкой массой, большой эффективностью ЭМА преобразования, небольшим притяжением к ферромагнитным объектам контроля и лишённых мёртвой зоны.

Для решения поставленной задачи необходимо выбрать такую моду ультразвуковой волны, на которую в наименьшей степени влияет толщина ферромагнитного объекта контроля. Также необходима оптимизация намагничивающих систем ЭМА преобразователей из постоянных магнитов численными методами с целью уменьшения их массогабаритных характеристик при увеличении создаваемого намагничивающими системами поляризующего поля.

Избежать большого притяжения к ферромагнитным объектам контроля возможно за счёт применения импульсных подмагничивающих устройств в качестве намагничивающих систем ЭМА преобразователей, либо за счёт использования бесконтактного магнитострикционного возбуждения ультразвуковых волн без использования поляризующего поля. Для получения однозначных резуль-

татов контроля и избавления от мёртвой зоны необходимо разработать многоканальную схему сканирования.

Во второй главе основное внимание уделено выбору моды УЗ волны для сканирующего волноводного контроля длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки ЭМА методом. Волноводный метод контроля осуществляется с применением волны Лэмба, Рэлея, либо нормальных поперечных волн. При контроле объектов с толщиной стенки до 10 мм обычно используются моды $SV1$, либо $SV2$ волны Лэмба, ввиду высокого соотношения сигнал/шум для данного диапазона толщин. Эти моды обладают большой дисперсией, поэтому для каждой конкретной толщины объекта контроля необходимо подбирать частоту зондирующего импульса и период излучающей и приёмной меандровых катушек, что приводит к необходимости замены ЭМА преобразователей и перестройки генератора зондирующих импульсов при изменении толщины объекта контроля. При толщине объекта более 10 мм существенно увеличивается период меандровой катушки, а значит, и размеры самого ЭМА преобразователя, что влечёт за собой увеличение массогабаритных характеристик намагничивающей системы, поэтому для толстостенных объектов целесообразно использовать волну Рэлея.

В идеальном случае волна Рэлея распространяется вблизи поверхности полупространства. Длинномерный ферромагнитный объект, обладающий конечной толщиной, сравнимой с длиной волны λ , полупространством не является, поэтому при толщине слоя более 2λ , фазовая скорость (следовательно, и условия возбуждения) волны Рэлея практически совпадают с фазовой скоростью нулевой симметричной ($S0$) и нулевой антисимметричной ($A0$) нормальных волн, которые излучаются с практически одинаковыми скоростями.

При толщине слоя менее 2λ чистая рэлеевская волна «распадается» главным образом на те же нормальные волны, но скорости их заметно отличаются. Распространяясь, волны $S0$ и $A0$ интерферируют одна с другой. Вблизи от излучателя, где разность фаз между ними близка к нулю, их суммарное акустическое поле подобно аку-

стическому полю рэлеевской волны (R), поэтому описанную совокупность волн $S0$ и $A0$ можно назвать «квазирэлеевской» волной.

Проведенные эксперименты на длинномерных ферромагнитных объектах, представляющих собой трубы различного диаметра и различной толщины с искусственными дефектами типа «пропил» и сквозное сверление на внешней поверхности трубы, показали, что волну Рэлея можно успешно применять на объектах с толщиной стенки от 16 мм: выявлено единственное чёткое отражение от каждого дефекта (рисунок 1в). При толщине стенки 11 мм сигнал от дефекта начинает раздваиваться, и регистрируется квазирэлеевская волна (рисунок 1б). При толщине менее 10 мм моды $S0$ и $A0$ окончательно разделяются, от одного дефекта регистрируются два сигнала (рисунок 1а). Эти волны, при известных скоростях, также можно использовать при контроле объектов с толщиной стенки менее 11 мм.

Экспериментальные данные были получены с помощью однонаправленных первичных ЭМА преобразователей, представляющих собой вложенные друг в друга катушки в форме меандра, период которого определяет длину запускаемой или принимаемой ультразвуковой волны, а значит, и моду волн Лэмба и Рэлея. Во внешнюю катушку подавался зондирующий импульс, который преобразовывался в бегущую в обе стороны от катушки ультразвуковую волну. Во вложенную излучающую катушку подавался зондирующий импульс со сдвигом фазы в 90° относительно зондирующего импульса во внешней катушке. Таким образом, при преодолении волной расстояния, равного четверти периода меандра (или длины запускаемой и принимаемой волны), она попадала под действие вложенной катушки, что давало усиление сигнала в два раза для волны, бегущей в одну сторону от излучателя, и практически полное затухание волны, бегущей в другую сторону. Аналогично, сигнал с приёмных катушек сдвигался электроникой по фазе и складывался. Такая схема, кроме усиления сигнала и соотношения сигнал/шум, позволяет излучать и принимать сигнал только с одной стороны. Ультразвуковые волны с противоположной стороны от преобразователя фильтруются, так как они рассогласованы по фазе с основной волной.

В конце главы показано, что для дальнейшего увеличения эффективности ЭМА преобразователей необходима разработка намагничивающих систем, создающих в материале ферромагнитного объекта контроля большие полярирующие поля. Этому вопросу посвящены следующие главы.

Результаты второй главы опубликованы в работах [1] и [5].

В третьей главе показаны результаты моделирования пространственного распределения магнитного поля и магнитного потока от типовых намагничивающих систем ЭМА преобразователей вблизи границы и в материале длиномерного ферромагнитного объекта с большой толщиной стенки. Рассмотрен принцип построения намагничивающих систем, основанный на неколлинеарном расположении постоянных магнитов. Представлены результаты модельной оптимизации и экспериментальной проверки полученной намагничивающей системы из постоянных магнитов.

Проведённые экспериментальные исследования показали, что оптимальной амплитудой поля при параллельном намагничивании является величина 300 – 400 А/см. При напряжённости поля менее 250 А/см уровень сигнала падает более, чем в 5 раз как при возбуждении, так и при приёме. Для эффективного возбуждения и приёма ультразвуковых волн ЭМА методом при ортогональном намагничивании необходимо создать в материале ферромагнетика магнитную индукцию более 0,9 Тл. Расчёт методом конечных элементов показал, что типовые намагничивающие системы ЭМА преобразователей обладают неоптимальными, завышенными значениями массогабаритных характеристик и силами магнитного притяжения к ферромагнитному объекту контроля. При этом они не обеспечивают создания в материале ферромагнетика необходимого для эффективного ЭМА преобразования полярирующего поля.

Для создания ортогонального полярирующего поля следует использовать неколлинеарный способ построения магнитных систем, основанный на расположении постоянных магнитов вокруг объёма пространства, в котором концентрируется поле, и в нахождении таких направлений поляризации постоянных магнитов, при которых поле в заданном объёме пространства максимально.

Поле вдоль силовой линии больше поля вдоль любого другого направления. Таким образом, если в точку, в которой предполагается создать максимальное поле, поместить точечный диполь, то силовые линии этого диполя покажут оптимальное направление поляризации постоянных магнитов, которые создадут максимальное поле в этой точке.

На рисунке 2а показано распределение магнитной индукции для намагничивающей системы с оптимальными направлениями поляризации магнитов. Результаты получены в программе Femm 4.2. Как видно из рисунка, такая намагничивающая система способна намагнитить материал ферромагнетика до индукции, превышающей 2 Тл, и, таким образом, подходит для оптимального возбуждения и приёма ультразвуковых волн в металлах. Но изготовить такую систему довольно сложно: необходимы десятки видов магнитов с различными направлениями поляризации и сложные оправки для сборки. Путём последовательного уменьшения количества элементов и усреднения направлений поляризации магнитов в каждом элементе была получена система, показанная на рисунке 2б. Из рисунка видно, что индукция в рабочей области намагничивающей системы составляет 1,55 Тл, а поле достаточно однородно. Вес упрощённой намагничивающей системы составляет 3 кг, а простота конструкции открывает большие возможности для промышленного изготовления.

Результаты третьей главы опубликованы в работе [2].

Четвертая глава посвящена выводу аналитических выражений для расчёта геометрических и электрических параметров импульсной П-образной намагничивающей системы ЭМА преобразователя. Приведён пример расчёта параметров намагничивающей системы для возбуждения волн Рэлея на длинномерных ферромагнитных объектах с большой толщиной стенки, а также экспериментальная проверка полученных результатов.

Создание параллельного поляризуемого поля возможно за счёт использования импульсного намагничивания. При подмагничивании постоянным полем важную роль играет толщина ферромагнитного объекта: чем она больше, тем сложнее создать требуемое магнитное поле вследствие растекания магнитного потока

по объёму ферромагнетика. При импульсном намагничивании в ферромагнетике возникают вихревые токи, «выталкивающие» магнитный поток к его поверхности, поэтому отпадает необходимость в намагничивании ферромагнитного объекта по всей его толщине, что является существенным преимуществом использования импульсного подмагничивания. Кроме того, можно использовать короткий импульс подмагничивания, что существенно снизит энергопотребление импульсного электромагнита, так как чем меньше длительность подмагничивающего импульса, тем меньше глубина скин-слоя и тем проще создать в нём требуемое магнитное поле.

Импульсный П-образный электромагнит для ЭМА преобразователя состоит из двух полюсов, ярма и катушки, намотанной на ярмо (рисунок 3). При импульсном перемагничивании ярмо и полюса должны быть выполнены из высокочастотного магнитомягкого материала, например из тонколистовой электротехнической стали или феррита.

Определение геометрических и электрических параметров осуществлялось методом расчёта магнитной цепи с помощью аналогов законов Ома и Кирхгофа. Уравнения магнитостатики для рассматриваемой магнитной цепи имеют следующий вид:

$$\Phi_{\text{я}} = \Phi_{\text{в}} + \Phi_{\text{с}} \quad (1)$$

$$F_M = U_{\text{я}} + U_n + U_z + U_c \quad (2)$$

где: $\Phi_{\text{я}}$, $\Phi_{\text{в}}$, $\Phi_{\text{с}}$ – магнитный поток в ярме, воздухе и скин-слое соответственно; F_M – общая магнитодвижущая сила (МДС, физическая величина, характеризующая способность электрических токов создавать магнитные потоки и определяемая количеством ампервитков в катушке импульсного электромагнита); $U_{\text{я}}$, U_n , U_z , U_c – падение магнитного потенциала на ярме, полюсах, зазоре и скин-слое соответственно.

Решая уравнения магнитостатики, были получены математические выражения для расчёта геометрических и электрических параметров импульсного П-образного электромагнита, создающего оптимальное для эффективного ЭМА преобразования параллельное поляризуемое поле. С помощью полученных выражений был произведен рас-

чёт параметров намагничивающей системы для возбуждения волн Рэлея на длинномерных ферромагнитных объектах с большой толщиной стенки.

Для проверки эффективности возбуждения волн Рэлея при импульсном подмагничивании был изготовлен П-образный электромагнит, соответствующий вычисленным параметрам. Внешний вид электромагнита приведён на рисунке 4а. Реальный импульс, полученный с генератора, а также зондирующий импульс показаны на рисунке 4б. Проверка показала, что импульсная намагничивающая система обеспечивает такую же чувствительность и соотношение сигнал/шум при двойном ЭМА преобразовании, что и намагничивающая система с неколлинеарной конфигурацией постоянных магнитов.

Результаты четвёртой главы опубликованы в работе [3].

Как показано в **пятой главе**, ЭМА возбуждение ультразвуковых колебаний за счёт магнитострикционного эффекта возможно и без поляризующего поля, при этом частота возбужденных в ферромагнитном объекте контроля УЗ колебаний равна удвоенной частоте возбуждающего поля (по отношению к частоте тока в излучающей катушке ЭМА преобразователя), так как магнитострикционный эффект – чётный, то есть не зависит от направления вектора магнитного поля. Тем не менее, такая возможность не используется при разработке ЭМА преобразователей для неразрушающего контроля ферромагнитных материалов.

Особенностью магнитострикции в железе и сталях на его основе является её немонотонная зависимость от приложенного поля. В слабых полях магнитострикция растёт, а затем уменьшается до магнитострикции насыщения. По этой причине эффективность возбуждения ультразвука на удвоенной частоте будет сначала возрастать с увеличением амплитуды возбуждающего поля, затем уменьшится до нуля, а после снова начнёт увеличиваться.

Эффективность генерации ультразвука $P(H)$ за счёт магнитострикции определяется глубиной скин-слоя $\delta(H)$ на заданной частоте и величиной изменения магнитострикции $M(H)$ при заданной амплитуде возбуждающего поля:

$$P(H) \sim M(H) \cdot \delta(H) \quad (3)$$

При генерации ультразвука на удвоенной частоте ЭМА методом материал ферромагнетика циклически перемагничивается, поэтому магнитную проницаемость ферромагнетика можно определить как эффективную магнитную проницаемость

$$\mu_{эф}(H) = \frac{\Delta B}{\Delta H} \cdot \frac{1}{\mu_0}, \text{ а глубину скин-слоя как } \delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \cdot \omega_{эф}} \cdot \frac{1}{\mu_{эф}(H)}}.$$

При генерации ультразвука эффективная магнитная проницаемость будет уменьшаться при повышении амплитуды возбуждающего переменного магнитного поля, поэтому по мере роста амплитуды глубина скин-слоя будет возрастать.

Экспериментальная проверка (рисунок 5) высказанных предположений показала, что при больших амплитудах переменного магнитного поля эффективность возбуждения на основной частоте с поляризующим полем и на удвоенной частоте без поляризующего поля примерно равны, что объясняется одновременным увеличением коэффициента магнитострикции и уменьшением эффективной магнитной проницаемости при возбуждении без поляризующего поля.

Результаты пятой главы опубликованы в работе [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что повышение чувствительности ЭМА преобразователей при контроле ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки возможно за счёт использования волны Рэлея и квазиэлеевских волн, так как они обладают малой дисперсией и затуханием. Для исключения неоднозначности результатов при волноводном контроле ЭМА методом разработана многоканальная схема включения вложенных друг в друга со сдвигом фазы первичных ЭМА преобразователей, позволяющая излучать и принимать ультразвуковой сигнал только с одной стороны (однонаправленные первичные ЭМА преобразователи). Последующее повышение чувствительности достигается за счёт оптимизации величины и пространственной конфигурации поляризующего поля ЭМА преобразователя.

2. На основании численного моделирования и экспериментальных исследований разработана конструкция на-

магнитизирующего устройства с неколлинеарной конфигурацией постоянных магнитов, позволяющая получить ортогональное к поверхности ферромагнетика однородное магнитное поле во всей рабочей области ЭМА преобразователя и обеспечивающая создание в поверхностном слое объекта контроля вне зависимости от его толщины магнитной индукции до 2 Тл при массе намагнитывающей системы не более 3 килограммов. Предложенная конструкция обеспечивает почти десятикратное увеличение соотношения сигнал/шум при генерации и приеме ультразвуковых волн ЭМА методом по сравнению с типовыми намагнитывающими системами.

3. Разработана компактная импульсная П-образная намагнитывающая система для ЭМА преобразователя с тангенциальным поляризующим полем, позволяющая полностью избавиться от сил магнитного притяжения преобразователя к ферромагнитным объектам контроля и обеспечивающая такую же чувствительность и соотношение сигнал/шум при двойном ЭМА преобразовании, что и намагнитывающая система с неколлинеарной конфигурацией постоянных магнитов.

4. Экспериментально показано, что при амплитуде намагнитывающего поля более 300 А/см эффективность не требующего поляризующего поля магнитоотрицательного возбуждения ультразвуковых волн на удвоенной частоте не уступает эффективности возбуждения на основной частоте при наличии магнитной поляризации.

5. Разработана линейка новых ЭМА преобразователей и устройств для бесконтактной сканирующей ультразвуковой диагностики длинномерных ферромагнитных объектов с большой толщиной стенки, отличающихся увеличенной чувствительностью к дефектам сплошности и улучшенными массогабаритными характеристиками:

- ЭМА преобразователь с постоянным ортогональным к поверхности объекта контроля поляризующим полем, создаваемым системой с неколлинеарной конфигурацией постоянных магнитов;
- ЭМА преобразователь с импульсным поляризующим полем, направленным параллельно поверхности объекта контроля;
- магнитоотрицательный излучатель ультразвуковых колебаний.

Разработанный на основе полученных результатов оптимизированный ЭМА преобразователь с постоянным ортогональным к поверхности объекта контроля поляризирующим полем был использован АО «НПО «Интротест» при разработке сканера-дефектоскопа ЭМА-МГТУ-2.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ:

1. Алешин, Н.П. Автоматизированный ультразвуковой контроль труб большого диаметра / Н.П. Алешин, Ю.Л. Гобов, **А.В. Михайлов** и др. // Дефектоскопия. – 2014. – № 3. – С. 3–11.
2. Гобов, Ю.Л. Намагничивающая система для ЭМА-сканера дефектоскопа / Ю.Л. Гобов, **А.В. Михайлов**, Я.Г. Смородинский // Дефектоскопия. – 2014. – № 11. – С. 48–56.
3. Михайлов, А.В. Электромагнитно-акустический преобразователь с импульсным подмагничиванием / **А.В. Михайлов**, Ю.Л. Гобов, Я.Г. Смородинский, С.В. Щербинин // Дефектоскопия. – 2015. – № 8. – С. 14–23.
4. Гобов, Ю.Л. Магнестрикционное электромагнитно-акустическое возбуждение ультразвуковых волн без поля смещения / Ю.Л. Гобов, **А.В. Михайлов**, Я.Г. Смородинский // Дефектоскопия. – 2016. – 12. – С. 32–37.

Результаты интеллектуальной деятельности:

5. Пат. 142323 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/265, F 17 D 5/00. Сканирующий дефектоскоп / Ю.Л. Гобов, **А.В. Михайлов**, Я.Г. Смородинский; заявитель и патентообладатель ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт физики металлов УрО РАН – № 2014106000/28; заявл. 18.02.2014; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18. – 2с.

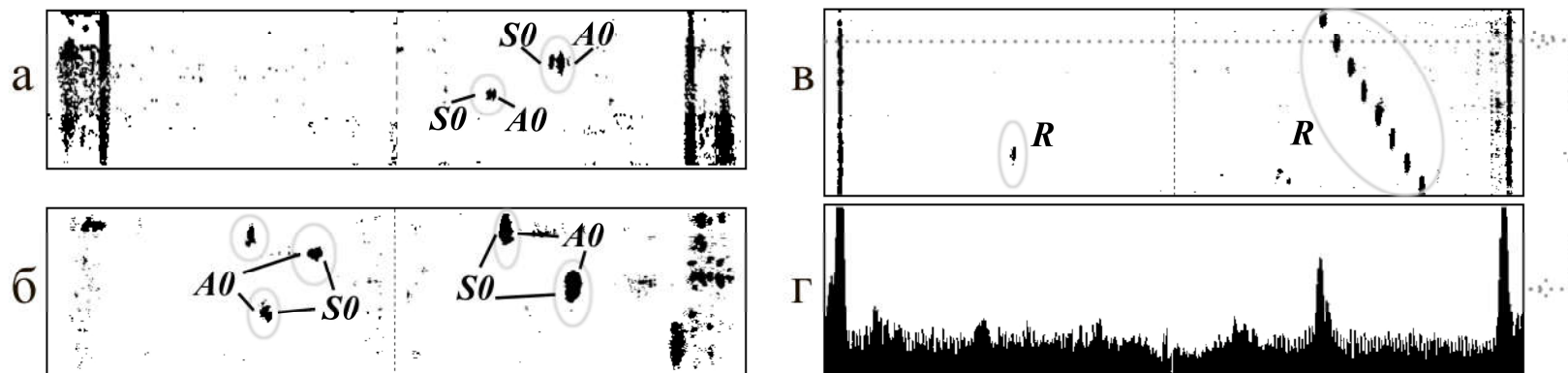


Рисунок 1 — А-скан (Г) и получаемые при обработке С-сканы труб с толщиной стенки 9 мм (а), 11 мм (б), 16 мм (в); дефекты на рисунках а, б, в отмечены серой рамкой

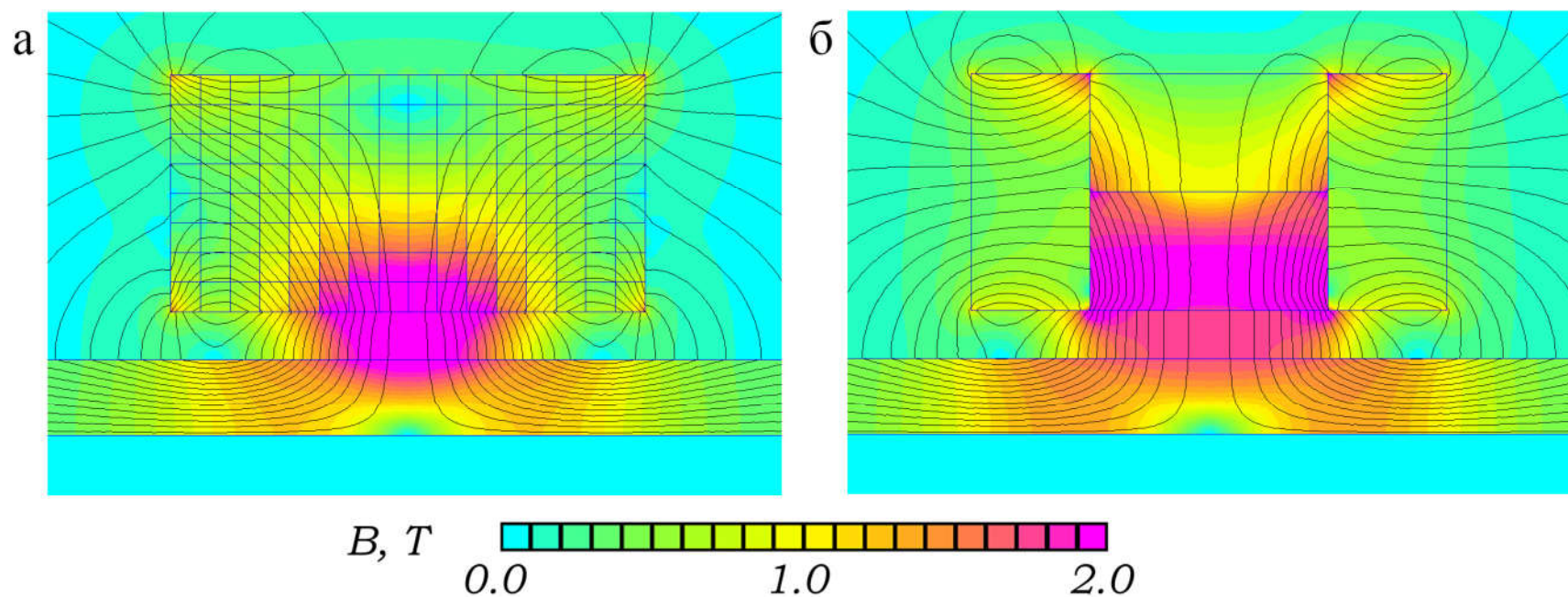


Рисунок 2 — Распределение магнитной индукции от идеальной (а) и упрощенной (б) оптимизированных намагничивающих систем

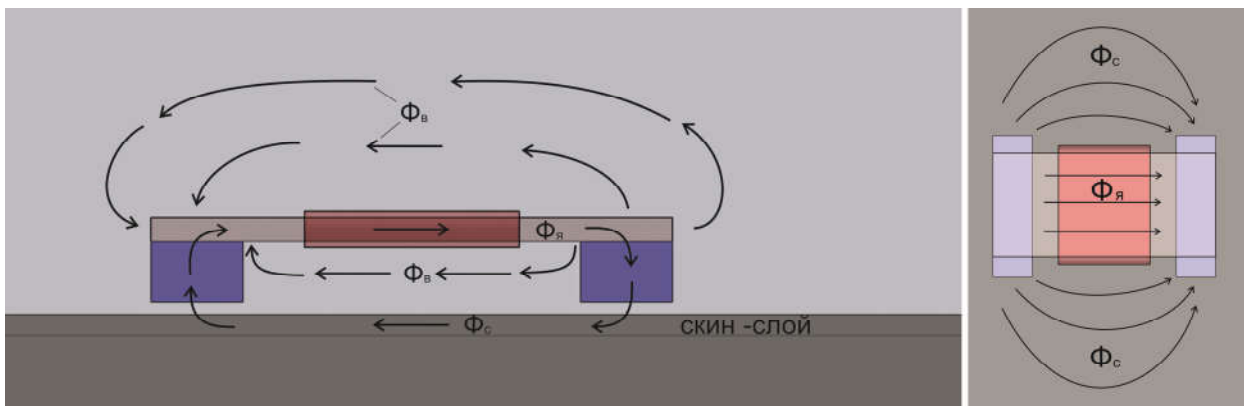


Рисунок 3 — Распределения магнитного потока в импульсном П-образном электромагните, воздухе и металле

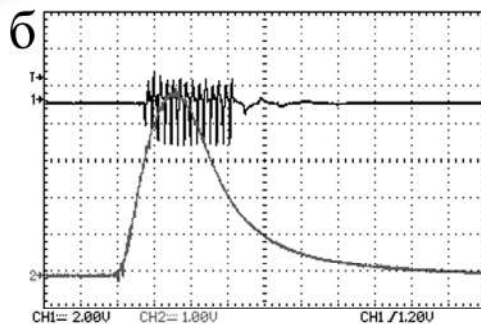


Рисунок 4 — Внешний вид импульсного П-образного электромагнита (а), полученная осциллограмма зондирующего и подмагничивающего импульсов (б)

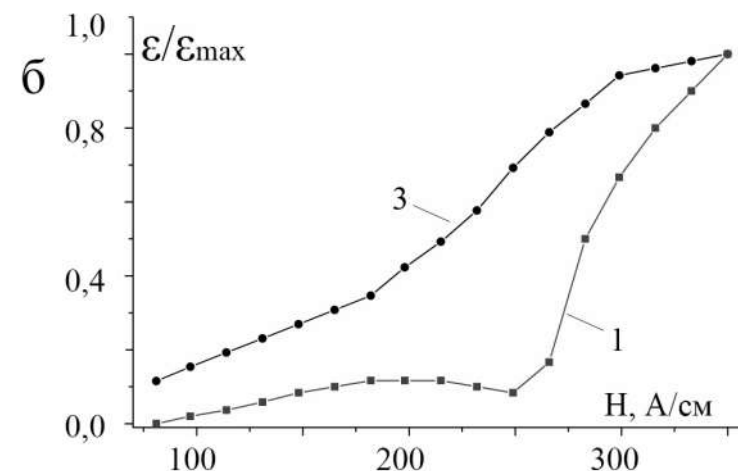
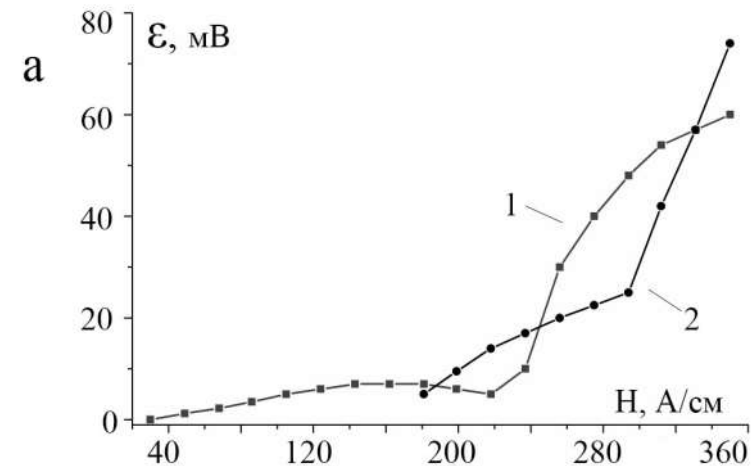


Рисунок 5 — Зависимость амплитуды принятых ультразвуковых волн от напряженности перемгничивающего поля: 1, 2 - волны Рэлея на удвоенной (без поляризующего поля) и основной частоте (с использованием поляризующего поля), 3 - волны Лэмба на основной частоте