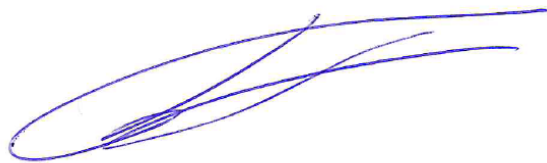


На правах рукописи



Белянков Василий Юрьевич

**ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ
ЛЕГКОСПЛАВНЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель:

Гольдштейн Александр Ефремович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Суханов Дмитрий Яковлевич, д.ф.-м. н.,
доцент, ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский
государственный университет»,
доцент кафедры радиофизики

Бурков Михаил Владимирович, к.т.н.,
Институт физики прочности и
материаловедения СО РАН, г. Томск,
научный сотрудник лаборатории механики
полимерных композиционных материалов

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО "Алтайский государственный
университет"

Защита состоится 18 декабря 2018 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: Россия, 634050, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/916>.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Е. А. Шевелева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

С быстрыми темпами развития буровых технологий для достижения максимальных технико-экономических показателей возникает необходимость совершенствовать приборы и методы контроля бурового оборудования, в частности легкосплавных бурильных труб (ЛБТ), изготавливаемых из алюминиевых сплавов согласно ISO 15546-2011 (трубы ЛБТ по ГОСТ 23786-79). Преимуществами этих труб являются: небольшой вес; высокий коэффициент плавучести в буровом растворе; коррозионная стойкость в агрессивных средах (сероводород и углекислый газ); более высокая по сравнению со стальными бурильными трубами гибкость, облегчающая вписываемость труб в сильно искривленные участки ствола; немагнитность материала, что требуется для проведения инклинометрии скважин. Наиболее эффективными и широко используемыми методами неразрушающего контроля (НК) ЛБТ являются вихретоковый и ультразвуковой методы. В настоящее время, в соответствии с нормативными документами, контроль толщины стенки таких труб производится с использованием акустического метода, имеющего недостатки, связанные с высокой трудоемкостью и низкой производительностью контроля в условиях буровой площадки. Вихретоковый метод контроля толщины стенки ЛБТ может рассматриваться как альтернативный, свободный от указанных недостатков.

Тело трубы и зона неразъемного трубного соединения наиболее подвержены появлению дефектов при эксплуатации ЛБТ, что может привести к разрушению бурильной колонны (БК). Несмотря на требования российских ГОСТов, предписывающих проведение ультразвукового контроля толщины стенки трубы в нескольких сечениях, часто требуется получение более подробной информации о состоянии стенки тела трубы для повышения достоверности контроля и предупреждения аварий. На сегодняшний день, несмотря на большое разнообразие толщиномеров, на рынке отсутствуют мобильные системы для оперативного контроля толщины стенки ЛБТ в полевых условиях, с возможностью получения полной картины ее состояния. Создание такого оборудования крайне необходимо для повышения достоверности контроля, оценки остаточного ресурса и планирования дальнейших действий для обеспечения безаварийной работы.

Цель диссертационной работы и задачи исследования

Цель работы – разработка методов и средств вихретокового контроля толщины стенки бурильных труб в условиях буровой площадки при изменении основных влияющих факторов в широком диапазоне.

Задачи исследования

1. Разработать модель взаимодействия магнитного поля вихретокового преобразователя (ВТП) и немагнитной трубы, позволяющей оценить характер влияния на выходной сигнал преобразователя основных влияющих факторов.

2. Создать алгоритм преобразования сигнала ВТП, позволяющего обеспечить измерение контролируемого параметра объекта в условиях изменения влияющих факторов в широком диапазоне.

3. Разработать средства аппаратной и программной технической реализации многочастотного метода измерения толщины стенки бурильной трубы.

4. Разработать методики первичной и рабочей настройки толщиномера.

Методы исследования

При проведении исследований использовались методы аналоговой и цифровой обработки сигналов, методы аналитического расчета, математического моделирования и анализа, методы визуализации данных.

Научная новизна диссертационной работы

Разработана модель взаимодействия магнитного поля вихретокового преобразователя и немагнитной трубы с использованием метода конечных элементов, позволяющая оценить характер воздействия на выходной сигнал преобразователя основных и дополнительных влияющих факторов: толщины стенки трубы, зазора между преобразователем и поверхностью трубы, электропроводности материала, кривизны поверхности трубы, наличия участков с плавным изменением толщины клиновидного характера и с локальным утонением сферической формы, поворота оси преобразователя относительно поверхности трубы, поперечного смещения оси преобразователя.

Предложен многочастотный метод измерения толщины стенки трубы, основанный на использовании в качестве функции преобразования экспериментальной зависимости фазы вносимого напряжения нижней частоты от значения зазора, и толщины стенки, корректируемой в зависимости от изменения фазы вносимого напряжения верхней частоты, обусловленного изменением электропроводности материала.

Доказана эффективность использования в многочастотных вихретоковых толщиномерах метода разделения частотных составляющих сигнала вихретокового преобразователя, основанного на возбуждении в объекте контроля вихревых токов синхронизированных частот и разделении частотных составляющих с использованием импульсных фильтров нижних частот с конечными импульсными характеристиками.

Предложены способы проведения первичной и рабочей настроек вихретокового толщиномера.

Практическая значимость полученных результатов

Разработанный вихретоковый толщиномер позволяет оперативно решать задачи по контролю стенки ЛБТ в диапазоне толщин 5...15 мм при значении воздушного зазора до 15 мм, обеспечивает погрешность измерений $\pm 5\%$ в рабочем диапазоне и надежное выявление коррозионных и эрозионных поражений, как внутренней, так и внешней поверхности трубы.

Разработанные методы и средства позволяют производить мобильный контроль в условиях буровой площадки.

Используемые алгоритмы преобразования сигналов измерительной информации позволяют проводить измерения в широком диапазоне изменения влияющих факторов и могут быть применены для создания новых мобильных систем вихретокового контроля.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы в научно-производственной деятельности ООО «НПК Интроскопия» (г. Томск) при разработке четырехканальной системы вихретокового контроля толщины стенки легкосплавных бурильных труб в условиях буровой площадки.

Адаптированные результаты работы используются для обучения студентов по дисциплине «Методы электрического, магнитного и вихретокового контроля», а также обучения специалистов вихретокового неразрушающего контроля.

Апробация работы

Результаты проведенных исследований обсуждались на научных семинарах в Национальном исследовательском Томском государственном университете, радиофизический факультет (Томск, 2018), Алтайском государственном университете, физико-технический факультет (Барнаул, 2018), в Государственном региональном центре стандартизации, метрологии и испытаний Томской области (Томск, 2018), на Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest 2017 (Бердск, 2017), V Международной конференции школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (Томск, 2016), Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest 2015 (Алтай, 2015), XVI Международной научно-технической конференции «Измерение. Контроль. Информатизация» (Барнаул, 2015).

Публикации

В соответствии с темой диссертации опубликовано 8 печатных работ, 6 из которых в журналах, входящих в перечень ВАК и Scopus Получено 2 патента на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 106 страницах машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 91 источник, из которых 59 на русском языке, 32 – на иностранных, и приложений. Работа содержит 5 таблиц и 28 рисунков.

Положения, выносимые на защиту

1. Модель взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с немагнитной трубой, разработанная с помощью метода конечных элементов, позволяет оценить характер влияния изменения основных параметров объекта контроля на сигнал вихретокового преобразователя.

2. Для обеспечения высокой достоверности контроля толщины стенки при широком диапазоне изменений основных влияющих факторов может быть

применен многочастотный метод, основанный на использовании в качестве функции преобразования экспериментальной зависимости фазы вносимого напряжения нижней частоты от значения зазора и толщины стенки, корректируемой в зависимости от изменения фазы вносимого напряжения верхней частоты, обусловленного изменением электропроводности.

3. Для разделения частотных составляющих сигнала вихретокового преобразователя толщиномера может быть эффективно использован метод, основанный на возбуждении в объекте контроля вихревых токов синхронизированных частот и разделении частотных составляющих с использованием импульсных фильтров нижних частот с конечными импульсными характеристиками.

4. Проведение первичной и рабочей настроек вихретокового толщиномера обеспечивает достижение требуемых метрологических характеристик в условиях изменений основных влияющих факторов в широком диапазоне.

Личный вклад автора

Разработал модель взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с легкосплавной бурильной трубой для исследования влияющих факторов с использованием программного продукта Comsol Multiphysics. Провел экспериментальные исследования для подтверждения адекватности полученной модели. Разработал алгоритм преобразования выходного сигнала ВТП в значение толщины стенки ЛБТ. Написал программу в среде LabView для исполнения алгоритма и визуализации результатов. Участвовал в разработке контрольных образцов, методик первичной настройки, рабочей настройки, калибровки, реализовал их на практике. Проводил лабораторные испытания прототипа вихретокового толщиномера. Адаптировал и внедрял полученные результаты в процесс обучения студентов и специалистов неразрушающего контроля.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены: актуальность диссертационной работы; положения научной новизны; используемые методы; цели, задачи и направление исследований; представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются методы НК толщины стенки ЛБТ и объект контроля.

Легкосплавная бурильная труба представляет собой сборную конструкцию, состоящую из алюминиевого тела трубы и стальной замковой части, соединенных между собой с помощью трубной резьбы (ГОСТ 23786-79). Соединение является неразъемным и работает в течение всего срока службы бурильной трубы. На практике наиболее распространены трубы из алюминиевых сплавов марки 1953Т1 и Д16Т. Основными причинами выхода из строя ЛБТ являются разрушение основного тела трубы и зоны неразъемного трубного соединения, вызванное коррозионным воздействием, эрозией и механическим износом. Важность своевременного, оперативного и достоверного контроля толщины стенки сложно переоценить, так как

разрушение трубы и, как следствие, ствола бурильной колонны, приводит к огромным экономическим издержкам и рискам, связанным с обеспечением безопасности рабочего персонала.

В соответствии с нормативными документами, используемыми на территории России на текущий момент, контроль толщины стенки таких объектов производится с использованием акустического метода контроля, имеющего недостатки, связанные с высокой трудоемкостью и низкой производительностью контроля. Вихретоковый метод контроля толщины стенки бурильных труб может рассматриваться как альтернативный метод, свободный от указанных недостатков. Наибольшее применение для решения рассматриваемой задачи вихретоковым методом нашли накладные ВТП, достоинствами которых являются: универсальность; возможность контроля объектов плоской, цилиндрической и сложной форм с односторонним доступом к объекту контроля (ОК); локальность, позволяющая обеспечить высокую разрешающую способность и точно определить зону дефекта при сканировании поверхности ОК.

Сложность решения задачи измерения толщины стенки электропроводящих труб с использованием накладного ВТП обусловлена возможным существенным изменением в производственных условиях контроля толщины стенки зазора между ВТП и поверхностью контролируемой трубы, а также удельной электрической проводимости материала трубы и существенным влиянием этих параметров на сигнал ВТП. Задача измерения толщины стенки электропроводящих труб заключается в нахождении функциональной зависимости информативных параметров сигнала накладного ВТП от измеряемого параметра трубы – толщины стенки T с отстройкой от влияния на результаты измерения изменений в широких диапазонах зазора между ВТП и поверхностью контролируемой трубы h , и удельной электрической проводимости материала трубы σ . Нелинейности функций преобразования делают такую задачу сложной для обеспечения работы в широком диапазоне изменений влияющих факторов.

Наиболее эффективным способом отстройки от влияния на результаты вихретокового контроля одновременно нескольких влияющих факторов является использование многочастотного возбуждения вихревых токов. В настоящей работе предлагается вариант реализации метода контроля толщины стенки электропроводящей трубы T в условиях значительного изменения зазора h и удельной электрической проводимости материала σ с использованием двух частот, а также обосновывается перспектива использования третьей частоты.

Во второй главе рассматривается моделирование взаимодействия электромагнитного поля ВТП с немагнитной трубой. Вихретоковые преобразователи широко применяются для решения различного спектра задач, включающих измерение толщины металлических объектов, электропроводящих и непроводящих покрытий на металлическом основании, контроль электрической проводимости материалов, дефектоскопии и структуроскопии изделий различной геометрии из ферромагнитных и немагнитных сплавов.

Задача измерения толщины стенки немагнитного электропроводящего объекта и диэлектрического зазора между ВТП и поверхностью объекта контроля

заслуживает особого внимания по отношению к настоящей работе. Выбор накладного ВТП обусловлен достаточно высокими требованиями к точности и разрешающей способностью контроля, которые должны обеспечивать возможность локализации дефектов как при точечной инспекции, так и при сканировании объекта, а также универсальностью и возможностью контроля изделий различной формы и с односторонним доступом. Для определения функций преобразования необходимо проанализировать взаимодействие электромагнитного поля ВТП с ЛБТ с учетом основных влияющих факторов. В общем случае амплитуда и фаза вносимого напряжения ВТП определяются его конструктивными параметрами, электромагнитными характеристиками материала и геометрией, взаиморасположением преобразователя и ОК.

На Рисунке 1 схематично показана конструкция накладного трансформаторного ВТП, расположенного над сегментом немагнитной трубы с толщиной стенки T . Вихретоковый преобразователь содержит обмотку возбуждения w_1 , измерительную обмотку w_{21} и компенсационную обмотку w_{22} .

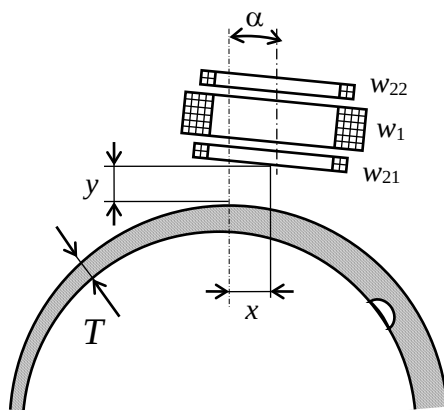


Рисунок 1 – Накладной вихретоковый преобразователь над немагнитной трубой

Для расчета результатов взаимодействия магнитного поля ВТП с электропроводящим объектом, и определения функций преобразования влияющих факторов в параметры сигнала ВТП, хорошо себя зарекомендовали аналитические модели, позволяющие исследовать множественные варианты взаимодействия при достаточно высокой степени соответствия теоретических и экспериментальных результатов.

Однако такие аналитические решения получены для ограниченного класса задач взаимодействия, предполагающих, как правило, осесимметричное взаимное расположение ВТП и ОК, имеющего при этом правильную геометрическую форму (плоскую, сферическую, цилиндрическую и т.д.). Данные решения не позволяют исследовать влияние на выходной сигнал ВТП таких часто встречающихся при контроле факторов, как линейное и угловое смещение оси симметрии ВТП относительно оси симметрии ОК, изменение формы ОК к несимметричной, дефекты неправильной формы, локальное утонение толщины стенки, краевой эффект.

От указанного недостатка свободны численные методы, наибольшее применение из которых для рассматриваемого класса задач получил метод

конечных элементов (МКЭ). Это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, получаемых при решении задач прикладной физики. Широко используется для решения задач механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики. Преимущества МКЭ при решении задач заключаются в универсальности применения, произвольной форме обрабатываемой области, отсутствии необходимости аппроксимации объекта стандартными геометрическими фигурами, возможности решения несимметричных задач с учетом неоднородности параметров материалов и сред. Модель с разбиением расчетной области на конечные элементы показана на Рисунке 2.

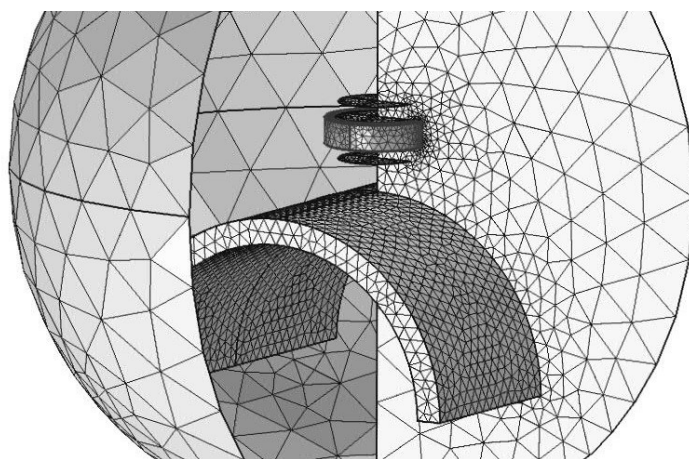


Рисунок 2 – Расчетная модель, построенная методом конечных элементов

Основные результаты, полученные с помощью указанной модели, графически отображены на Рисунках 3–7 в виде годографов относительного вносимого напряжения ВТП $\bar{U}_{\text{вн}}^*$ от изменения параметров ОК. Следует отметить, что результаты математического моделирования достаточно хорошо совпадают с результатами физического. Количественное расхождение в исследуемом диапазоне изменений влияющих факторов не превышает 7%.

На Рисунке 3 показаны годографы относительного вносимого напряжения накладного ВТП от изменения удельной электрической проводимости σ , зазора h и толщины T при использовании двух частот – 2500 и 125 Гц. Частоты выбраны таким образом, чтобы на верхней частоте f_1 выполнялось приближенное равенство глубины проникновения магнитного поля половине толщины стенки, а на нижней частоте f_2 глубина проникновения магнитного поля превышала толщину стенки. Анализ зависимостей показывает, что информация о толщине стенки может быть получена путем измерения фазы вносимого напряжения нижней частоты. Влияющими факторами в этом случае являются изменения зазора и удельной электрической проводимости материала, значения которых также, хотя и в меньшей степени, влияют на значение фазы вносимого напряжения. С учетом того, что чувствительность изменения фазы нижней частоты к изменению толщины стенки является неоднородной для различных диапазонов последней, то и погрешность измерения, вызванная изменением зазора и электропроводности будет различной. Так, изменение зазора на 1 мм в

диапазоне измерения толщин с наибольшей чувствительностью к изменению фазы нижней частоты 12...15 мм эквивалентно изменению толщины до 1,3 мм и обуславливает погрешность $\pm 10\%$, а изменение электропроводности на 1 МСм/м эквивалентно изменению толщины до 1 мм и обуславливает погрешность $\pm 8\%$ в том же диапазоне. Приведенные результаты показывают, что необходима отстройка от изменения указанных влияющих факторов.

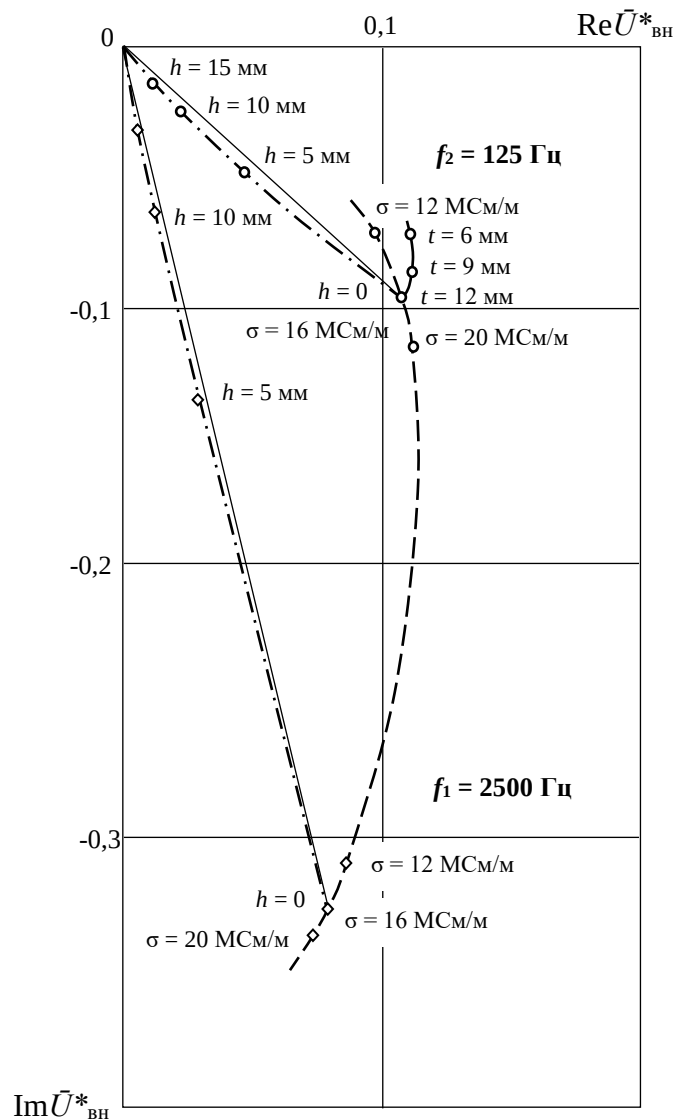


Рисунок 3 – Годографы $\bar{U}_{вн}^*$ от изменения удельной электрической проводимости σ (—), зазора h (---) и толщины T (—) для частот 2500 ($\diamond$ – $\diamond$) и 125 Гц ($\circ$ – $\circ$)

Кроме основных влияющих факторов исследованы и дополнительные, вызывающие изменение сигнала ВТП при контроле толщины стенки. Применительно к рассматриваемой задаче взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с электропроводящей трубой использование МКЭ позволяет осуществить анализ влияния на выходной сигнал преобразователя не только удельной электрической проводимости материала, толщины стенки, зазора между ВТП и поверхностью трубы, но и, в отличие от упомянутых аналитических моделей, анализ влияния линейной и угловой несоосностей

ВТП и трубы, радиуса кривизны поверхности, изменения толщины с различной геометрией, наличия локальных утонений стенки трубы (см. Рисунок 1).

Годографы от изменения кривизны поверхности объекта контроля (Рисунок 4) представляют собой близкие к прямым линии, пересекающиеся с годографом от изменения зазора под углом примерно $5...10^\circ$. Изменение радиуса кривизны R поверхности трубы на 10 мм при зазоре $h = 5$ мм, эквивалентно изменению толщины на 1 мм, что обуславливает погрешность порядка 8 % в диапазоне значений толщины 12...15 мм.

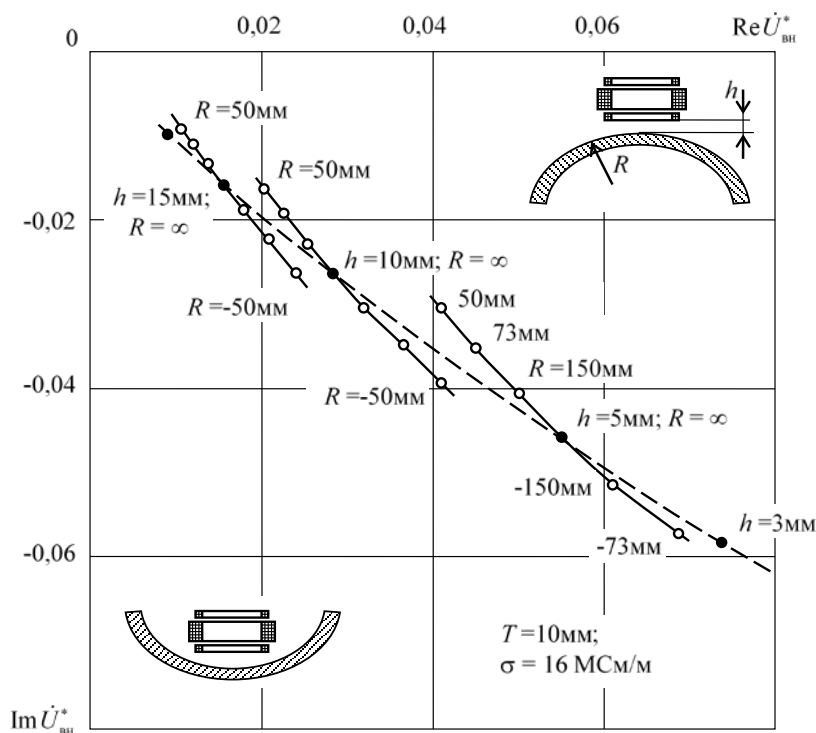


Рисунок 4 – Годографы $\bar{U}_{BH}^*$ от изменения зазора и радиуса кривизны поверхности объекта контроля

Годографы $\bar{U}_{BH}^*$ от смещения продольной оси ВТП относительно поперечной оси трубы представляют собой близкие к прямым линии (Рисунок 5), практически совпадающие с годографами от изменения зазора. Существенное изменение сигнала ВТП имеет место при значениях смещения, превышающих половину радиуса витков обмоток ВТП для используемого соотношения радиусов возбуждающей обмотки и трубы.

Сигнал ВТП при его расположении над объектом с клиновидным характером изменения толщины идентичен сигналу ВТП, расположенному над объектом с толщиной стенки, равной значению толщины на продольной оси преобразователя (Рисунок 6).

Годографы $\bar{U}_{BH}^*$ от изменения диаметра локального утонения сферической формы в диапазоне $0... \infty$ представляют собой близкие к прямым линии, соединяющие точки на годографе от изменения толщины пластины, соответствующие отсутствию утонения и диаметру, значительно превышающему диаметр обмоток ВТП (Рисунок 7). Резкое изменение сигнала

ВТП, обусловленное наличием локального утонения, наблюдается при значениях, соизмеримых с диаметром обмоток ВТП.

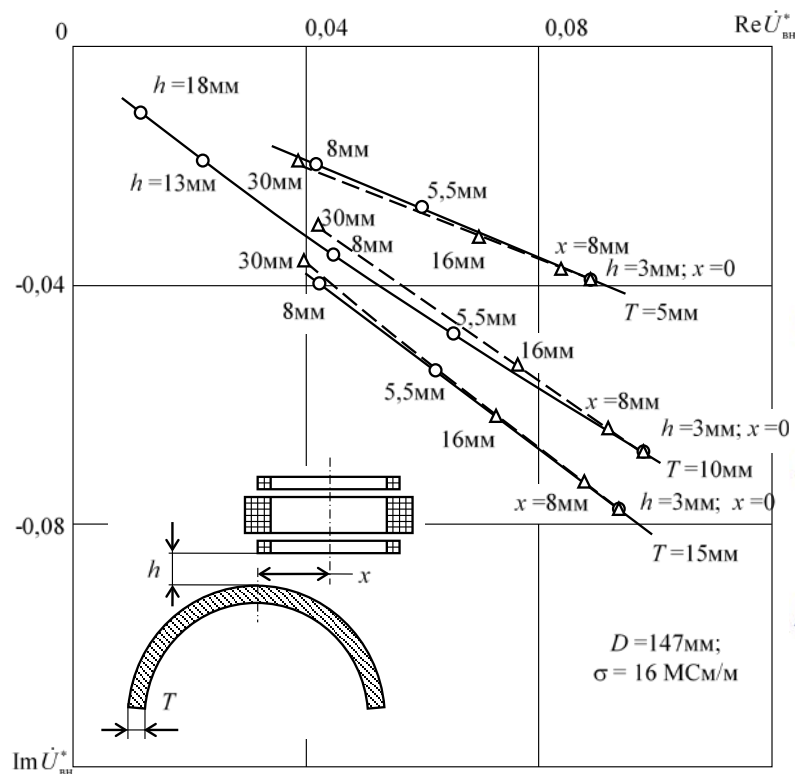


Рисунок 5 – Годограф $\bar{U}^*_{BH}$ от поперечного смещения ВТП относительно объекта контроля

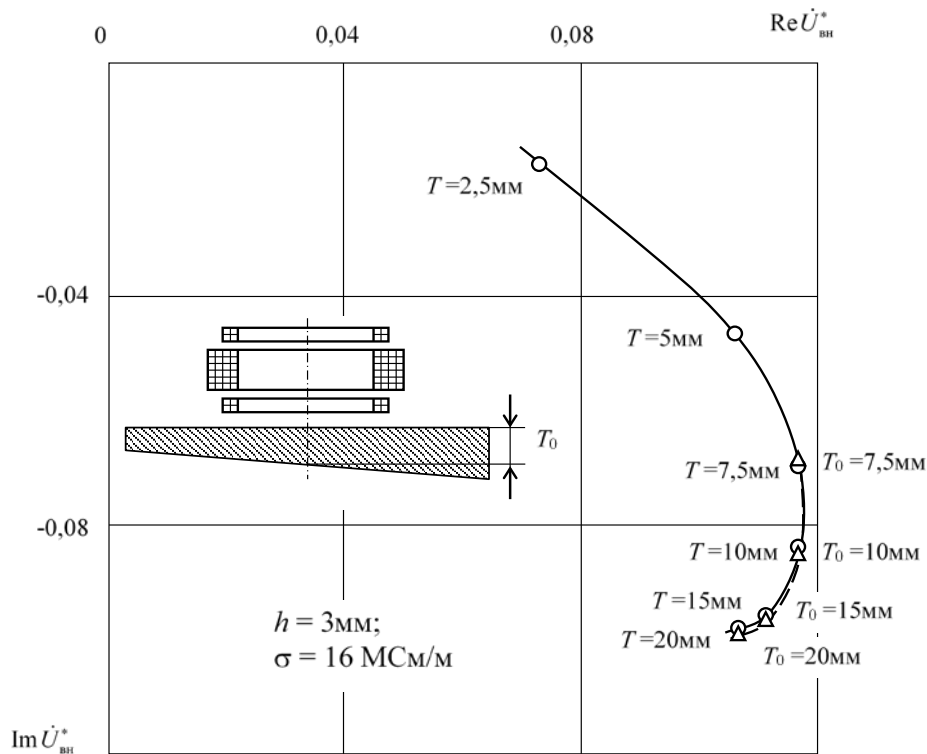


Рисунок 6 – Годограф $\bar{U}^*_{BH}$ от клиновидного изменения толщины стенки объекта контроля

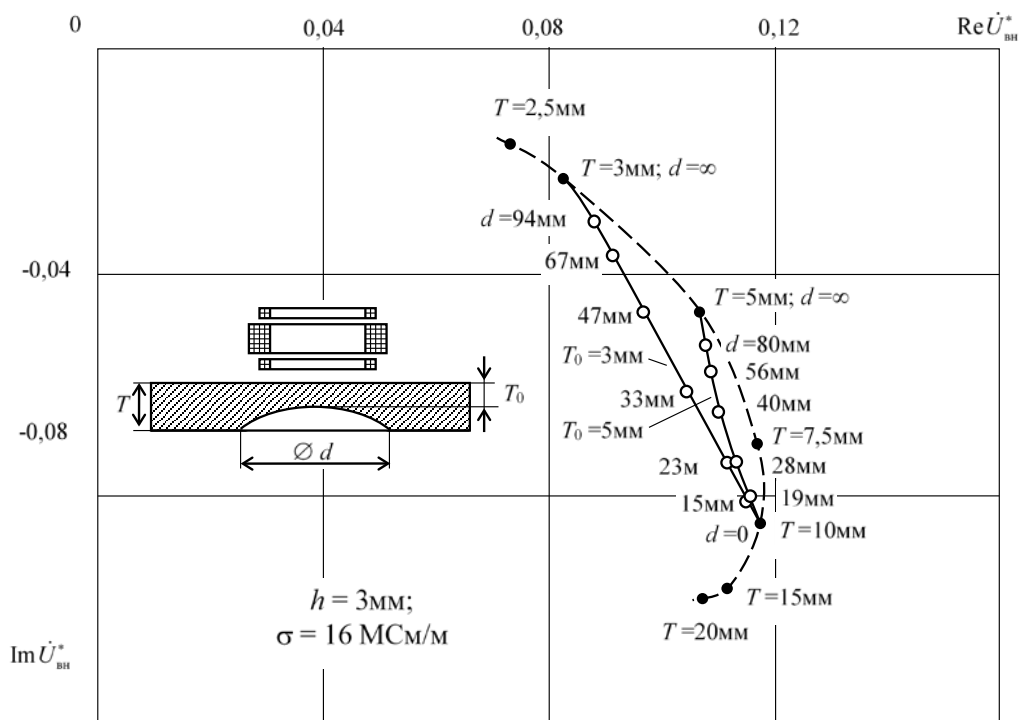


Рисунок 7 – Годографы $\bar{U}_{вн}^*$ от изменения диаметра локального утонения сферической формы с внутренней стороны объекта контроля

В третьей главе рассматривается алгоритм преобразования сигнала ВТП толщиномера, позволяющий осуществить эффективную отстройку от влияния на результат измерений толщины объекта основных влияющих факторов. На Рисунке 8 показана структурная схема предлагаемого вихретокового толщиномера, содержащего двухчастотный генератор Г, вихретоковый преобразователь ВТП, блок аналогового преобразования БАП и вычислительный блок ВБ.

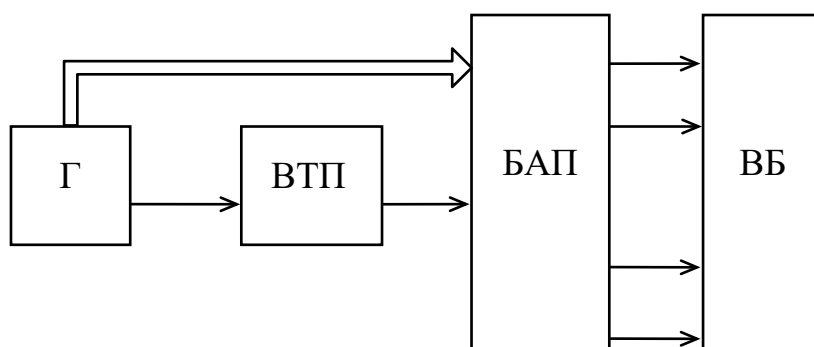


Рисунок 8 – Структурная схема вихретокового толщиномера

Током обмотки возбуждения ВТП, подключенной к выходу генератора, создается двухчастотное магнитное поле. Благодаря встречному включению измерительной и компенсационной обмоток при отсутствии вблизи ВТП электропроводящего объекта выходной сигнал вихретокового преобразователя равен нулю. При наличии вблизи ВТП электропроводящего объекта магнитное поле возбуждения наводит в контролируемом изделии вихревые токи двух

частот. Магнитное поле этих вихревых токов обуславливает возникновение выходного сигнала (вносимого напряжения) ВТП. Блоком аналогового преобразования осуществляется выделение комплексных составляющих сигнала ВТП, обусловленных каждой из двух частотных составляющих магнитного поля вихревых токов. Выходные сигналы блока аналогового преобразования пропорциональны амплитудам действительной и мнимой комплексных составляющих вносимых напряжений верхней и нижней частот f_1 и f_2 соответственно: $\text{Re } \bar{U}_{\text{вн1}}, \text{Im } \bar{U}_{\text{вн1}}, \text{Re } \bar{U}_{\text{вн2}}, \text{Im } \bar{U}_{\text{вн2}}$.

Вычислительным блоком осуществляется преобразование выходных сигналов блока аналогового преобразования в измеряемое значение контролируемого параметра. Для этого вычисляются амплитуда и фаза вносимого напряжения первой (2500 Гц) частоты A_1 и φ_1 , и фаза второй (125 Гц) частоты φ_2 :

$$A_1 = \sqrt{(\text{Re} \bar{U}_{\text{вн1}})^2 + (\text{Im} \bar{U}_{\text{вн1}})^2};$$

$$\varphi_1 = \arctg\left(\frac{\text{Im} \bar{U}_{\text{вн1}}}{\text{Re} \bar{U}_{\text{вн1}}}\right); \varphi_2 = \arctg\left(\frac{\text{Im} \bar{U}_{\text{вн2}}}{\text{Re} \bar{U}_{\text{вн2}}}\right).$$

Дальнейшее вычислительное преобразование сигналов измерительной информации осуществляется при помощи функций преобразования, определенных экспериментально с использованием образцов труб различной толщины T с фиксированной удельной электрической проводимостью материала σ_0 при различных значениях зазора h . В данном случае использованы функциональные зависимости для ЛБТ из сплава Д16Т с наружным диаметром 147 мм и толщиной стенки в диапазоне 5...15 мм, удельной электрической проводимостью материала 16 МСм/м и изменением значения зазора в диапазоне 0...15 мм.

На первом этапе вычислительного преобразования информативных параметров сигнала ВТП проводится вычисление значения зазора h . Для этого используется функция обратного преобразования относительного значения амплитуды A_1 вносимого напряжения первой частоты в значение зазора h , определяемая путем численного анализа экспериментальной зависимости амплитуды A_1 от зазора h . Данная функция аппроксимируется зависимостью вида:

$$h = a \ln\left(\frac{A_1}{A_{10}}\right),$$

где a – коэффициент, зависящий от наружного диаметра трубы, конструктивных параметров ВТП и диапазона изменений зазора h ; A_{10} – значение амплитуды при $h = 0$.

Далее вычисляется промежуточное значение толщины стенки T в предположении, что удельная электрическая проводимость материала трубы σ равна удельной электрической проводимости образцов σ_0 . Для этого используется функциональная зависимость толщины стенки трубы $T(h, \varphi_2)$. Для

определения значения T сначала определяют ближайшие к измеренному значению h его дискретные значения h_i и h_{i+1} , соответствующие толщинам образцов, использованных для определения зависимостей. Затем производится расчет соответствующих значений $T_i(h_i, \varphi_2)$ и $T_{i+1}(h_{i+1}, \varphi_2)$. Значение толщины T вычисляется в предположении линейности зависимости в малом диапазоне изменений зазора h :

$$T = T_i(h_i, \varphi_2) + \frac{T_{i+1}(h_{i+1}, \varphi_2) - T_i(h_i, \varphi_2)}{h_{i+1} - h_i} (h - h_i).$$

Дальнейшие вычислительные преобразования обеспечивают отстройку от влияния на результат контроля изменений удельной электрической проводимости материала σ . Для этого определяется значение фазы φ_{10} вносимого напряжения первой частоты при измеренном зазоре h и значении удельной электрической проводимости σ_0 , соответствующей используемым для определения функций преобразования образцам.

Экспериментальная зависимость фазы φ_{10} от зазора h с высокой степенью приближения аппроксимируется функцией:

$$\varphi_{10} = q \exp(b + ch + dh^2),$$

где b , c и d – экспериментально определяемые коэффициенты, зависящие от наружного диаметра трубы, частоты f_1 , значения удельной электрической проводимости σ_0 и конструктивных параметров ВТП.

Далее вычисляется разность фаз $\Delta\varphi_1$ между измеренным значением фазы φ_1 вносимого напряжения первой частоты и ее значением φ_{10} для используемых при определении функций преобразования образцов труб:

$$\Delta\varphi_1 = \varphi_1 - \varphi_{10}$$

Следующей вычислительной операцией является определение разности фаз $\Delta\varphi_2$ между измеренным значением фазы φ_2 вносимого напряжения второй частоты и ее значением φ_{20} для используемых при определении функций преобразования образцов. Разность фаз $\Delta\varphi_2$, обусловленная отличием значения удельной электрической проводимости материала контролируемой трубы σ от ее значения σ_0 , соответствующего используемым для определения функций преобразования образцам, связана с разностью фаз $\Delta\varphi_1$, обусловленной этой же причиной, линейной зависимостью вида:

$$\Delta\varphi_2 = s\Delta\varphi_1,$$

где множитель s является функцией толщины стенки трубы T : $s = s(T)$. В указанном ранее диапазоне изменений толщины стенки значение s изменяется в диапазоне 2,5...4,3. Зависимость $s(T)$ с высокой степенью приближения описывается функцией:

$$s(T) = \exp(k + mT + nT^2),$$

где k , m и n – экспериментально определяемые коэффициенты, зависящие от

наружного диаметра трубы, значения удельной электрической проводимости σ_0 , значений первой f_1 и второй f_2 частот, конструктивных параметров ВТП.

При определении значения множителя s , необходимого для вычисления значения $\Delta\varphi_2$, используется рассчитанное ранее значение толщины T . Затем вычисляется скорректированное значение фазы вносимого напряжения второй частоты, соответствующее используемым для определения функций преобразования образцам:

$$\varphi_{20} = \varphi_2 - \Delta\varphi_2.$$

Далее осуществляется повторное вычисление значения толщины T . Найденное уточненное значение толщины T вновь используется для последовательных вычислений значений s , $\Delta\varphi_2$, φ_{20} и нового значения толщины T . Описанный цикл вычислений повторяется несколько раз. Значение толщины T , рассчитанное в последнем цикле, принимается в качестве результата измерения контролируемого параметра T .

В четвертой главе рассматриваются особенности технических решений программной и аппаратной реализации вихретокового толщиномера. На Рисунке 9 показана структурная схема предлагаемого устройства, реализующего двухчастотный метод контроля. Толщиномер содержит два генератора 1 и 2 гармонических сигналов частот f_1 и f_2 , схему синхронизации 3, сумматор 4, ВТП с возбуждающей 5, измерительной 6 и компенсационной 7 обмотками, вычитающее устройство 8, амплитудно-фазовые детекторы 9–12, интегрирующие дискретизаторы 13–16 вычислительный блок 17 и устройство индикации 18. Особенностью является то, что в объекте контроля осуществляется возбуждение вихревых токов двух синхронизированных частот, благодаря чему поддерживаются стабильной разность частот:

$$f_1 - f_2 = a \cdot \Delta f,$$

где a – целое число, Δf – частота сигнала управления схемы синхронизации.

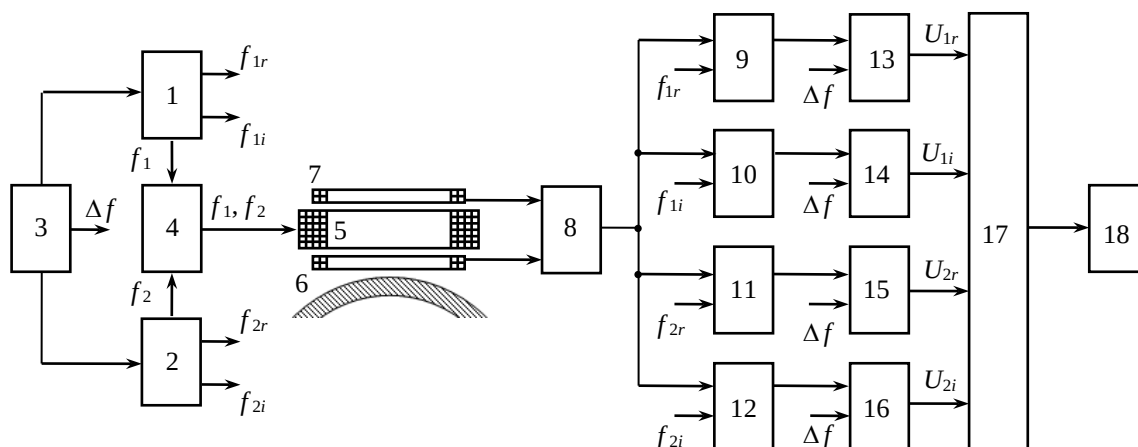


Рисунок 9 – Структурная схема двухчастотного вихретокового толщиномера

Такое возбуждение дает возможность осуществить качественное разделение сигналов ВТП, обусловленных каждой в отдельности частотной составляющей вихревых токов. Гармонические сигналы генераторов суммируются в определенной пропорции сумматором. Током обмотки возбуждения ВТП, подключенной к выходу сумматора, создается двухчастотное магнитное поле. Измерительная и компенсационная обмотки ВТП подключены к входам вычитающего устройства.

При отсутствии вблизи ВТП электропроводящего объекта выходные сигналы измерительной и компенсационной обмоток ВТП равны и, соответственно, в этом случае будет равен нулю выходной сигнал вычитающего устройства. При наличии вблизи ВТП электропроводящего объекта магнитное поле возбуждения наводит в контролируемом изделии вихревые токи двух частот. Магнитное поле этих вихревых токов обуславливает возникновение выходного сигнала (вносимого напряжения) ВТП.

Далее осуществляется выделение комплексных составляющих сигнала ВТП, обусловленных каждой из двух частотных составляющих магнитного поля вихревых токов. Для выполнения этой функции в состав толщиномера входят четыре одинаковых измерительных канала, содержащих каждый амплитудно-фазовый детектор и интегрирующий дискретизатор. Амплитудно-фазовыми детекторами осуществляется синхронное с соответствующей частотой управления f_j детектирование вносимого напряжения ВТП. Детекторы управляются квадратурными опорными напряжениями действительной f_{jr} и мнимой f_{ji} составляющих, формируемыми генераторами. Интегрирующий дискретизатор выполняет усреднение выходного сигнала амплитудно-фазового детектора за время $T=1/\Delta f$, формируемого схемой синхронизации.

Схемотехнически интегрирующий дискретизатор состоит из последовательно соединенных схем аналогового интегратора и запоминающего устройства, охваченных общей отрицательной обратной связью, и представляет собой импульсный фильтр нижних частот с конечной импульсной характеристикой. Благодаря такой структуре амплитудно-частотная характеристика измерительного канала толщиномера имеет нули на частотах, отличающихся от f_j на значения, кратные Δf (Рисунок 10). Таким образом, обеспечивается качественное разделение сигналов разных частот без использования избирательных резонансных усилителей, уменьшение полосы пропускания которых ограничено нестабильностью частото задающих элементов, характеристики которых даже при тщательном их подборе в значительной мере подвержены влиянию изменений температуры окружающей среды.

Выходные сигналы интегрирующих дискретизаторов пропорциональны амплитудам действительной и мнимой комплексных составляющих вносимых напряжений частот f_1 и f_2 : $U_{1r} U_{1i} U_{2r} U_{2i}$.

Благодаря указанному ранее выбору частот генераторов гармонических сигналов, выделенные составляющие сигнала ВТП на первой частоте зависят

только от зазора h между ВТП и удельной электропроводности материала σ , а составляющие сигнала на второй частоте – от зазора h , удельной электропроводности материала σ и толщины стенки T .

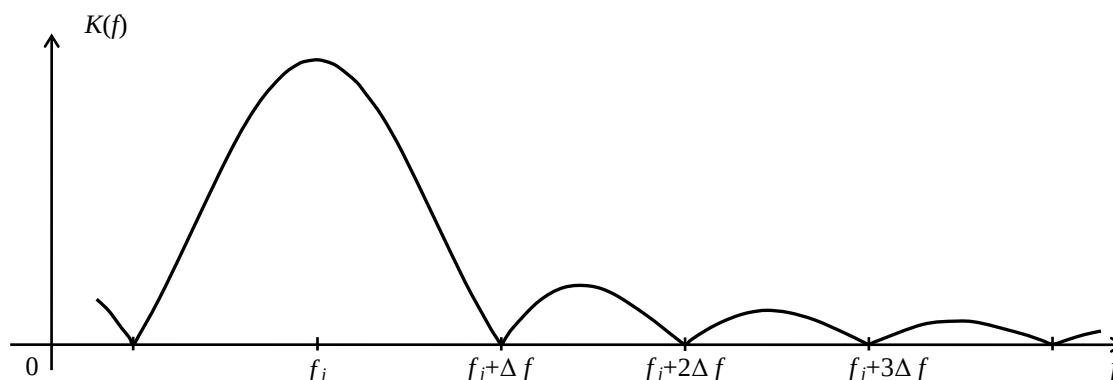


Рисунок 10 – Амплитудно-частотная характеристика измерительного канала толщиномера

На Рисунке 11 показан внешний вид толщиномера, включающего в себя ВТП, установленный на специальной площадке на образце трубы, блок аналогового преобразования, устройство сбора и передачи данных, а также вычислительный блок, представляющий собой портативный компьютер с программой для обработки и визуализации данных. Интерфейс прибора представлен на Рисунке 12.

В интерфейсе толщиномера отображается следующая информация:

- значение измеряемой толщины стенки трубы (индикатор «Толщина, мм»);
- значение зазора между трубой и ВТП (индикатор «Зазор, мм»);
- кнопка «Баланс» – для балансировки ВТП при отсутствии взаимодействия с объектом контроля;
- кнопка «Зазор h_0 » – для выполнения настройки толщиномера при нулевом значении зазора;
- регулятор «Толщина образца» и кнопка включения/отключения функции полстройки;
- регулятор «Диаметр трубы» – для выбора диаметра контролируемой трубы;
- индикатор «Брак», сигнализирующий о снижении измеренного значения толщины ниже значения установленного с помощью регулятора «Порог, мм»;
- табло «Диаграмма толщины, мм», на котором отображаются текущие измерения толщины, служит для просмотра изменения значений во времени (режим сканирования);
- кнопка «STOP» – для остановки измерений.



Рисунок 11 – Вихретоковый толщиномер. Внешний вид

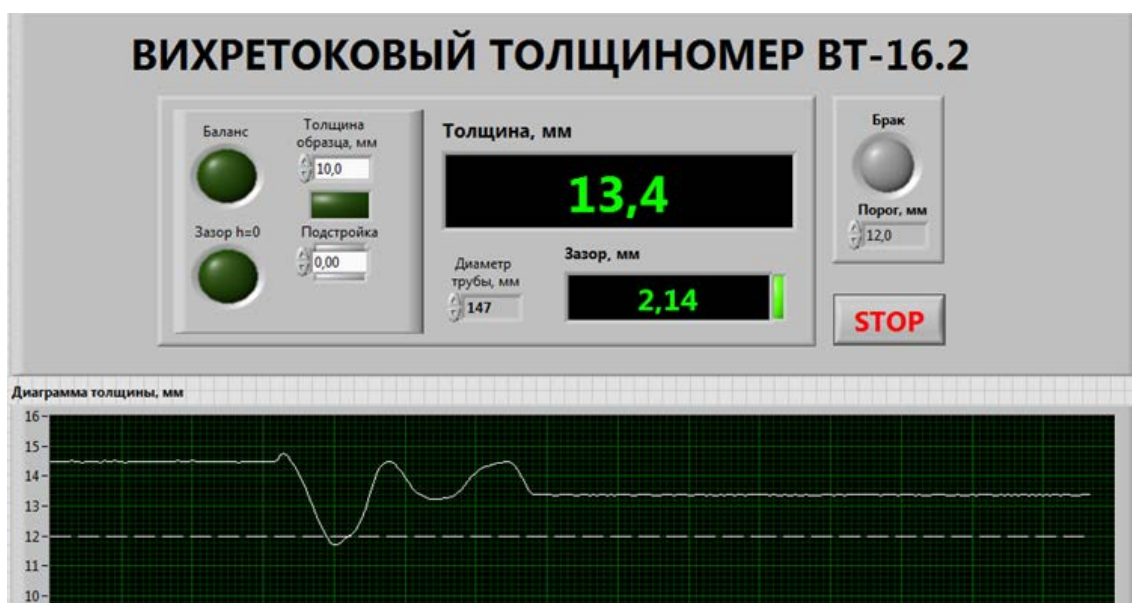


Рисунок 12 – Интерфейс вихретокового толщиномера

В пятой главе рассматривается метрологическое обеспечение вихретокового толщиномера.

Для корректной работы толщиномера в соответствии с заявленными характеристиками технической документации необходимо произвести подготовку прибора, включающую первичную и рабочую настройку.

На первом этапе выполняется первичная настройка, в соответствии с которой записываются данные амплитуды и фазы, соответствующие значениям толщин контрольных образцов, изготовленных из одной трубы с одинаковой электропроводностью, при фиксированных значениях зазора между поверхностью трубы и ВТП, определяемых микрометром с погрешностью ± 6 мкм. Настройка выполняется на этапе изготовления в условиях лаборатории при постоянной температуре. Коэффициенты функций преобразования

записываются для каждого ВТП и типоразмера ЛБТ, и выбираются перед началом эксплуатации в соответствующих настройках прибора для используемой пары. Для ЛБТ диаметром 147 мм зависимости показаны на Рисунке 13.

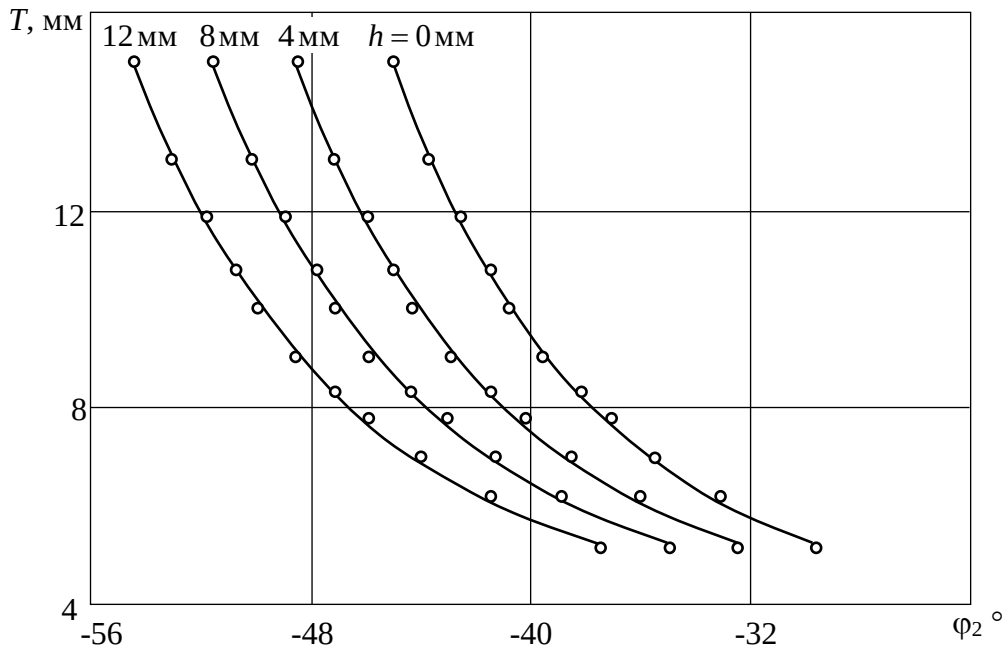


Рисунок 13 – Функция обратного преобразования фазы ϕ_2 вносимого напряжения нижней частоты в значение толщины стенки трубы T для разных значений зазора h при фиксированном значении σ

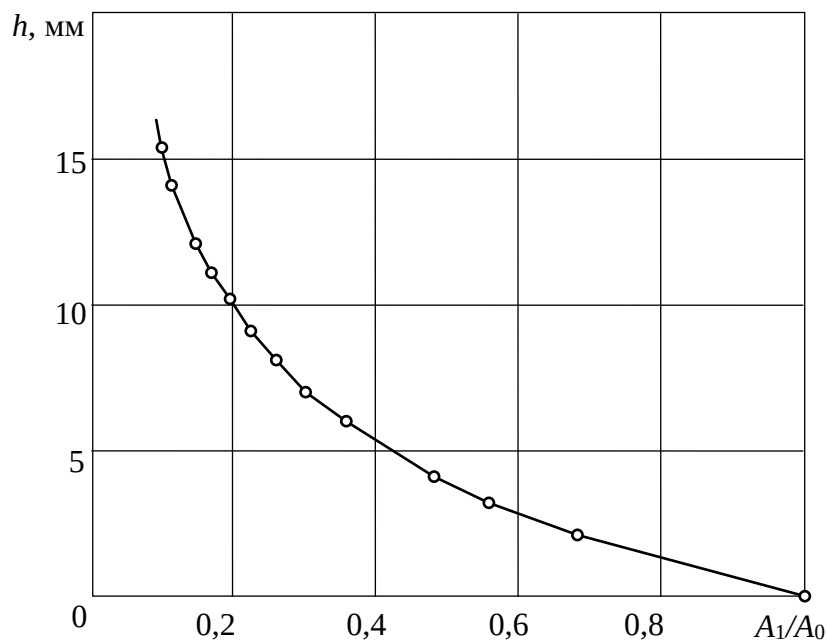


Рисунок 14 – Функция обратного преобразования относительного значения амплитуды вносимого напряжения первой частоты A_1 в значение зазора h

Перед началом работы с прибором выполняется рабочая настройка, в рамках которой производится балансировка ВТП при отсутствии объекта контроля и запись значения амплитуды A_{10} , которое используется для

вычисления зазора в соответствии с функцией, описанной в третьей главе. Затем проверяется отклонение показаний прибора от действительного значения и производится корректировка.

Для проверки соответствия между действительным и измеряемым значением с определенным интервалом производится калибровка толщиномера на контрольном образце. Показания должны быть в диапазоне заявленной точности прибора, в противном случае необходимо провести рабочую настройку. При возникновении сомнений оператора в результатах измерений толщины или зазора проводится внеочередная калибровка.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана модель с использованием МКЭ для исследования различных вариантов взаимодействия ВТП и объекта контроля, позволяющая определить влияние исследуемых параметров на результат измерений, определить и оптимизировать функции преобразования.

2. Проанализировано влияние на сигнал ВТП основных влияющих факторов: толщины стенки трубы, зазора между преобразователем и поверхностью трубы, электропроводности материала, кривизны стенки трубы, наличия участков с плавным изменением толщины клиновидного характера и с локальным утонением сферической формы, перекоса оси преобразователя относительно поверхности трубы, поперечного смещения оси преобразователя.

3. Предложен и реализован алгоритм преобразования сигнала в условиях изменения влияющих факторов, таких как изменение электропроводности объекта контроля, зазора между ВТП и поверхностью контролируемой трубы в широком диапазоне.

4. Доказана эффективность использования в многочастотных вихретоковых толщиномерах метода разделения частот сигнала ВТП, основанного на возбуждении в объекте контроля вихревых токов синхронизированных частот и разделении частотных составляющих с использованием импульсных фильтров нижних частот с конечными импульсными характеристиками.

5. Разработан вихретоковый толщиномер, позволяющий измерять толщину стенки ЛБТ в диапазоне 5...15 мм с погрешностью $\pm 5\%$ при изменении зазора 0...15 мм и отстройкой от изменения электропроводности объекта контроля.

6. Предложена методика проведения настройки прибора для обеспечения корректных результатов измерений в пределах заявленной погрешности, включающая первичную настройку для обеспечения необходимой функции преобразования и рабочую настройку.

7. Проведены испытания вихретокового толщиномера в лабораторных и полевых условиях. На основе выполненных исследований и результатов организацией-партнером ООО «НПК Интроскопия» (г. Томск) разработан мобильный сканирующий комплекс контроля толщины стенки ЛБТ в условиях

буровой площадки, который в настоящее время проходит опытную эксплуатацию.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus:

1. Goldshteyn A. E., Belyankov V. Yu. Analysis of the Impact of Major Influencing Factors on the Waveform of the Surface Eddy Current Probe for Electroconductive Nonmagnetic Pipe Thickness // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 671, Article number 012018. – P. 1–7.
2. Goldshteyn A. E., Belyankov V. Yu. An eddy-current gauge for measuring the wall thickness of light-alloy drill pipes // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. – Vol. 53. – № 8. – P. 588–595.
3. Goldshteyn A. E., Bulgakov V. F., Krening M. K., Kalganov S. A., Belyankov V. Yu. A Method of Eddy-current Testing of Bars and Tubes Based on the Eddy Currents with Different Frequencies of Circular and Longitudinal Directions Excitation // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, September 18-21, 2012. – Tomsk: TPU Press, 2012. – Vol. 2. – P. 143–147.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Гольдштейн А. Е., Белянков В. Ю. Вихретоковый измеритель толщины стенки легкосплавных буровых труб // Дефектоскопия. – 2017. – № 8. – С. 57–64.
2. Гольдштейн А. Е., Белянков В. Ю. Компьютерное моделирование различных конструктивных вариантов накладного вихретокового преобразователя дефектоскопа // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2. – С. 10–14.
3. Якимов Е. В., Гольдштейн А. Е., Булгаков В. Ф., Алхимов Ю. В., Белянков В. Ю. Измерение толщины стенки электропроводящих труб вихретоковым методом при значительных изменениях зазора // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 11. – С. 14–18.

Патенты:

1. Устройство для вихретокового контроля металлических немагнитных объектов: патент РФ № 2629711 / Гольдштейн А. Е., Белянков В. Ю. – Опубликовано 31.08.2017, бюл. № 25.
2. Способ вихретокового контроля толщины стенки металлических немагнитных труб: патент РФ № 2656115 / Гольдштейн А. Е., Белянков В. Ю., Якимов Е. В. – Опубликовано 31.05.2018.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БК – бурильная колонна
ВТП – вихретоковый преобразователь
ЛБТ – легкосплавная бурильная труба
МКЭ – метод конечных элементов
НК – неразрушающий контроль
ОК – объект контроля

Подписано в печать 17.10.2018.
Формат 60×84¹/₁₆. Печ.л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 816.
Отпечатано в ООО «Печатная мануфактура».
634055, г. Томск, ул. Королёва, д. 4, оф. 81
Тел./факс (3822) 49-31-19.
e-mail: pechat-tomsk @yandex.ru