

На правах рукописи

КОСТИНА МАРИЯ АЛЕКСЕЕВНА

**АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ПАЛЛЕТ**

*05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий»*

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Томск – 2019

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бразовский Константин Станиславович,

Официальные оппоненты: **Зуев Лев Борисович**
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией физики прочности.

Суханов Дмитрий Яковлевич
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», старший научный сотрудник.

Защита диссертации состоится «11» июня 2019 года в 12:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://dis.tpu.ru>

Автореферат разослан «____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационных исследования

В наше время трудно представить предприятие массового производства продукции, которое обходится без тары. Произведенную продукцию необходимо куда-то складировать, транспортировать непосредственно к потребителю или к месту торговой точки. Чтобы обеспечить сохранность транспортируемого товара от повреждений и потерь его необходимо правильно уложить, надежно закрепить и аккуратно довести до места назначения. Использование унифицированных поддонов для упаковки продукции, обеспечивает сохранность товара, увеличивает удобство погрузочно-разгрузочных работ, тем самым это позволяет сократить затрачиваемое на это время. Кроме того, компактное размещение продукции уменьшает занимаемую площадь складского помещения. Деревянные поддоны являются многооборотной тарой, т.е. могут использоваться неоднократно для перевозки, как тяжелых малогабаритных грузов, так и крупногабаритных. Во время перемещения груза паллет может быть поврежден в той или иной степени, что может привести к плачевным последствиям во время упаковки товара. Нарушение геометрических параметров паллет приводит к ошибке в работе автоматического устройства укладки продукции на поддон, при этом приходится тратить много времени на устранение аварийной ситуации, увеличиваются простои и издержки производства, что приводит к росту себестоимость продукции.

Комплексная оценка качества паллет с целью выявления всех дефектов (целостность досок, отсутствие трещин, сколов до гвоздя, отсутствие торчащих гвоздей.) и оперативное принятие верного решения для их устранения представляют собой сложнейшую задачу для оператора.

В связи с этим встала задача разработать автоматизированную систему контроля, которая позволила бы с высокой скоростью выявлять разного рода дефекты, контролировать габариты и осуществлять отбор поддонов без каких-либо повреждений и отклонений от нормы.

Целью диссертационной работы является разработка программно-аппаратного комплекса для оперативного контроля геометрических параметров и качества поддонов на основе двухчастотного зондирования с фазовой коррекцией.

Для достижения поставленной цели представляется необходимым решение следующих **задач**:

1. Разработать программную модель распространения сигналов разных частот в акустическом тракте, не имеющем боковых стенок.
2. Определить влияние параметров излучаемых сигналов и акустического тракта (соотношения частот, температуры окружающего воздуха, неравномерность площади отражающей поверхности и др.) на достоверность контроля.
3. Разработать двухчастотный способ зондирования объекта контроля с фазовой коррекцией и алгоритм определения дистанции при использовании двух излучаемых частот.

4. Определить технические и эксплуатационные требования, для разработки макетного образца прибора и провести его испытания.

5. Разработать программную модель трехмерной реконструкции поверхности контролируемого объекта.

Объектом исследования является акустический тракт эхо-импульсного дефектоскопа для оперативного контроля геометрических параметров поддонов.

Предметом исследования является двухчастотный способ зондирования объекта контроля с применением фазовой коррекции.

Научная новизна работы

1. Разработан способ обработки двухчастотного сигнала с фазовой коррекцией для контроля геометрических параметров паллет, основанный на поочередном излучении зондирующего сигнала на двух частотах, определении временной координаты и фазы срабатывания порогового устройства и на основе этих данных вычислении временной координаты начала эхо-сигналов, позволяющий снизить погрешность контроля.

2. Выявлен характер влияния параметров зондирования на погрешность определения временной координаты начала эхо-импульса. Показано, что для фиксированных частот 25 кГц и 40 кГц достигается минимальная погрешность контроля.

3. Выявлен характер влияния параметров усиления принятых сигналов на качество контроля. Показано, что при подборе фиксированного коэффициента усиления для сигнала каждой частоты, достигается наименьшая погрешность.

4. Разработан алгоритм обработки двухчастотных сигналов, позволяющий исключить срабатывание компараторов в разных периодах эхо-сигналов, что позволит сохранить погрешность в диапазоне менее четверти периода большей частоты.

5. Создан программно-аппаратный комплекс, состоящий из блока датчиков, размещающихся над конвейерной лентой, блока управления и программной среды для визуализации результатов контроля, обладающий лучшими характеристиками по сравнению с аналогами.

Практическая значимость работы:

- разработан способ двухчастотного зондирования с фазовой коррекцией, на основе которого можно проектировать ультразвуковые локаторы нового поколения с высокими техническими характеристиками, новизна которого подтверждена двумя патентами на изобретения;

- предложенные схмотехнические решения, защищенные патентами РФ, были использованы при проектировании программно-аппаратного комплекса для контроля геометрических параметров паллет;

- разработанный алгоритм обработки акустических сигналов, для определения временной координаты начала эхо-сигнала, можно использовать в акустических локаторах для уменьшения погрешности контроля дистанции;

- предложена математическая модель для анализа погрешности определения временной координаты начала эхо-импульса для выявления влияния параметров акустического тракта (излучаемые частоты, величина порогового

напряжения детектирующего устройства, расстояния до объекта контроля, параметров окружающей среды) на точность контроля.

Предложенный способ определения временного положения начала эхо-импульса позволил в два раза повысить точность ультразвукового лоатора.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Способ определения временной координаты эхо-импульса при двухчастотном зондировании объекта контроля с детектированием фазы сигнала, в которой произошло срабатывание компаратора, позволяющий уменьшить погрешность контроля.

2. Программный комплекс, позволяющий моделировать акустический тракт при изменении параметров зондирования, порогового устройства и акустического тракта для определения оптимальных параметров дефектоскопа.

3. Введение в алгоритм обработки эхо-сигналов расширенной итерационной матрицы позволяет получить разрешающую способность 0,5 мм при частоте зондирования 40 кГц при любом соотношении пороговых напряжений детектирующего устройства.

Внедрение результатов работы.

Разработанный прибор внедрен в технологический процесс предприятия по производству пива и безалкогольных напитков ОАО «Томское пиво», г. Томск.

Полученные в работе результаты позволили существенно снизить простои, связанные с пропуском бракованных поддонов на погрузку.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в отделении «Электронная инженерия» инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Томского политехнического университета в учебной дисциплине «Электронные промышленные устройства», а также в учебных исследовательских и научных исследовательских работах студентов.

Достоверность полученных теоретических и экспериментальных исследований, полученных результатов и выводов обеспечивается корректным применением современных численных методов, многочисленными экспериментальными исследованиями, устойчивой воспроизводимостью результатов и сопоставлением результатов, полученных разными методами и другими авторами. Достоверность полученных результатов подтверждается практической разработкой прибора для отбраковки поддонов по высоте, целостности верхней плоскости и обнаружению посторонних предметов на верхней плоскости поддона на линии упаковки готовой продукции.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы представлены на конференциях российского и международного уровня:

- II Международная научная конференция "Иностранный язык в контексте проблем профессиональной коммуникации" для студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 27-29 апреля 2015г.

- Control and Communications (SIBCON) : International Siberian Conference on Russia, Omsk, May 21-23, 2015.

- Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность: V Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 25-29 мая 2015 г.
- Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS): proceedings of the International Conference, Tomsk, 1-4 December, 2015.
- Control and Communications (SIBCON): Proceedings of the XII International Siberian Conference, Moscow, May 12-14, 2016.
- Инженерия для освоения космоса: IV Всероссийский молодежный форум с международным участием, г. Томск, 12-14 апреля 2016 г.
- VII Научно – практическая конференция «Информационно – измерительная техника и технологии» с международным участием, г. Томск, 25 - 28 мая 2016 г.
- Неразрушающий контроль: VI Всероссийская научно-практическая конференция "Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность", г. Томск, 23-27 мая 2016 г.
- Международном форуме «Россия в XXI веке: глобальные вызовы и перспективы развития». г. Москва, 8-10 декабря 2016г.
- XI Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы машиностроения», г. Томск, 4-6 апреля 2017 г
- IV Всероссийского молодежного Форума с международным участием "Инженерия для освоения космоса". Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2016.
- Control and Communications (SIBCON): Proceedings of the International Siberian Conference, Astana; Kazakhstan, July 31, 2017.
- VI Всероссийского молодежного Форума с международным участием "Инженерия для освоения космоса". Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2016.
- 1st Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018; National Research University "Higher School of Economics" Moscow; Russian Federation; 14 March 2018 до 16 March 2018.

Личный вклад автора заключается в:

- разработке способа двухчастотного зондирования с фазовой коррекцией и алгоритма обработки принятых сигналов;
- разработке математической модели методом геометрической акустики;
- проведении экспериментальных исследований и интерпретации данных при апробации программно-аппаратного комплекса для детектирования непригодной транспортировочной тары.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 23 печатных работ, в том числе 4 статьи в журналах из перечня ВАК, 14 статей из перечня Scopus и WoS, 4 патента РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения. Объем диссертации составляет 142 страниц, 83 рисунков и 8 таблиц. Обзор литературных источников содержит 130 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введение обосновывается актуальность темы исследования, научная и техническая новизна, кратко излагаются содержание работы и основные защищаемые положения. Также проводится обоснование выбора объекта исследования.

В первой главе проведен аналитический обзор уже существующих систем контроля паллет, рассмотрены стандартные методы неразрушающего контроля поддонов, а также описаны основные типы дефектов и отклонений геометрических параметров от нормы, возникающие в процессе эксплуатации паллет.

Для измерения геометрических параметров поддонов можно использовать методы неразрушающего контроля, такие как визуальный, оптический, акустический, рентгеновский.

Визуальная оценка качества поддонов осуществляется оператором из кабины при их прохождении по транспортеру. Основными критериями такой сортировки являются пороки и дефекты древесины, которые могут быть выявлены при внешнем осмотре поддонов. Контроль качества осуществляется только по внешним характеристикам. Кроме того, оценка поддонов с помощью этого метода субъективна и зависит от решения, принятого оператором. Низкие точность и скорость визуальной сортировки вынуждают предприятия средней и высокой мощности переходить к автоматизированным системам контроля качества.

Существуют средства неразрушающего контроля древесины, принцип работы которых основан на оценке разных характеристик оптического излучения. К такому излучению относятся видимое человеческим глазом излучение (свет), инфракрасное излучение, ультрафиолетовое излучение. Метод оптической дефектоскопии основывается либо на способности древесины по-разному отражать световой поток, либо на различии их оптических плотностей. К достоинствам можно отнести использование недорогого оборудования, обеспечение безопасности персонала и простоту применяемого устройства. Недостаток этого метода является очень малая глубина выявляемых дефектов и точность их размеров. Низкая освещенность и запыленность помещения снижают точность метода.

Для рентгенографии пиломатериалов используются устройства с одним, двумя, тремя или четырьмя источниками рентгеновского излучения. Принцип рентгенографии основан на свойстве рентгеновских лучей ослабевать в разной степени в зависимости от плотности исследуемого материала. Поскольку плотность дефектов выше или ниже плотности основной древесины, они проявляются на изображениях, полученных в ходе сканирования, в виде более темных или светлых по тону проекций на соответствующую плоскость, регистрирующую это излучение. Метод контроля качества пиломатериалов с помощью рентгеновского излучения дает точную информацию о расположении того или иного дефекта в материале, а также позволяет определить плотность древесины при фиксированной влажности. Недостатком этого метода является

высокая стоимость оборудования. При применении соответствующих приборов необходимо обеспечение радиационной безопасности персонала.

Одним из неразрушающих методов контроля качества древесины является акустическая сортировка. Измерение акустических сигналов в древесине - процедура сложная, поскольку древесина характеризуется анизотропией и скорость распространения волны сильно варьирует в зависимости от породы, возраста, направления волокон. Такие характеристики, как плотность, влажность, наличие пороков, также влияют на скорость распространения и коэффициент ослабления акустических волн в древесине. Чем больше трещин, пустот и дефектов в древесине, тем быстрее затухают акустические колебания. К акустическим методам неразрушающего контроля относят испытания материала, основанные на регистрации параметров упругих волн, возбуждаемых или возникающих в объекте исследования. Для акустического метода контроля качества используются колебания звукового и ультразвукового диапазонов частотой от 20 Гц до 30 МГц, которые посылаются в исследуемый объект импульсным либо же непрерывным способом.

Анализ методов контроля геометрических параметров паллет показал, что наиболее перспективным из них является ультразвуковой метод, в то время как остальные приведенные методы не обеспечивают требуемую заказчиком точность и дорогие в реализации.

Принцип работы эхо-импульсного ультразвукового дефектоскопа основан на регистрации времени распространения упругой волны в объекте контроля до дефекта или любой другой границы раздела двух сред и обратно. Погрешность в определении времени распространения эхо-сигнала является основной погрешностью систем контроля.

Для определения временной координаты момента прихода импульса используются различные способы: например, подача сигнала на вход компаратора. Срабатывание компаратора в этом случае произойдет в момент достижения сигнала порогового уровня. Для случая, когда имеем сигнал с затянутым фронтом, ошибка измерения может достигать нескольких периодов несущей частоты, введение поправочных коэффициентов ограничивается невозможностью предсказать крутизну нарастания переднего фронта сигнала.

Существенно повысить точность измерений можно с помощью метода двух компараторов с отличающимся порогом срабатывания. Срабатывание первого и второго компараторов происходит в разные моменты времени. Построение прямой по координатам этих точек позволяет найти время начала эхо-импульса и с помощью математических расчетов определить относительную ошибку. Однако, применение этого способа ограничено сигналами с линейной огибающей переднего фронта эхо-импульса, что на практике практически не встречается.

Метод аппроксимации огибающей сигнала позволяет повысить точность измерений. Способ базируется на аппроксимации нарастающей части огибающей акустического импульса двумя полиномами второй степени – для положительных и отрицательных экстремумов в разных периодах несущей частоты акустического импульса. Определение максимумов требует специальной математической

обработки, а также сложности в определении максимумов на уровне шумов не позволяет использовать первые периоды в качестве источников получения информации, использование же следующих периодов не позволит определить временную координату начала сигнала с высокой точностью.

Для точного определения момента прихода эхо-сигнала известен способ двухчастотного зондирования. Объект контроля зондируется двумя сигналами с разной частотой, а затем фиксируются временные координаты для каждого сигнала по моменту срабатывания компаратора. Способ позволяет определить момент прихода эхо-сигнала с максимальной ошибкой, которая будет равняться четверти периода эхо-сигнала. Двухчастотный способ не обеспечивает нам требуемую точность. Снизить погрешность можно введением фазовой коррекции в обработку данных.

Во второй главе приводится описание двухчастотного способа зондирования с фазовой коррекцией, а также описание математической модели акустического сигнала, на основе которой проведен анализ погрешностей контроля для различных случаев: разного соотношения частот, изменение порога срабатывания компаратора, зависимость погрешности от расстояния до объекта контроля.

Двухчастотное зондирование включает поочередное излучение импульсных сигналов на двух частотах, поочередный прием двух эхо-сигналов на этих частотах и измерение времени распространения каждого эхо-сигнала по моменту срабатывания порогового устройства. Из-за разного периода зондирующих сигналов срабатывание порогового устройства будет происходить в разные моменты времени, но в одинаковых номерах периодов для двух эхо-сигналов.

Двухчастотное зондирование с фазовой коррекцией включает следующую последовательность действий:

- 1) *Выбор частот зондирования.*
- 2) *Последовательное зондирование на выбранных частотах, определение времен t_1 и t_2 .*
- 3) *Построение итерационной матрицы:*

$$\begin{pmatrix} t_2 - t_1 \\ (t_2 - T_2) - (t_1 - T_1) \\ (t_2 - 2 \cdot T_2) - (t_1 - 2 \cdot T_1) \\ \vdots \\ (t_2 - n \cdot T_2) - (t_1 - n \cdot T_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_0 \\ k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

На рисунке 1 показан случай, когда срабатывание компаратора произошло в пятом периоде. Разница между временными координатами сокращается после каждой корректировки: $k_1 > k_2 > k_3 > k_4 > 0$; а после пятой корректировки она становится отрицательной: $k_5 < 0$.

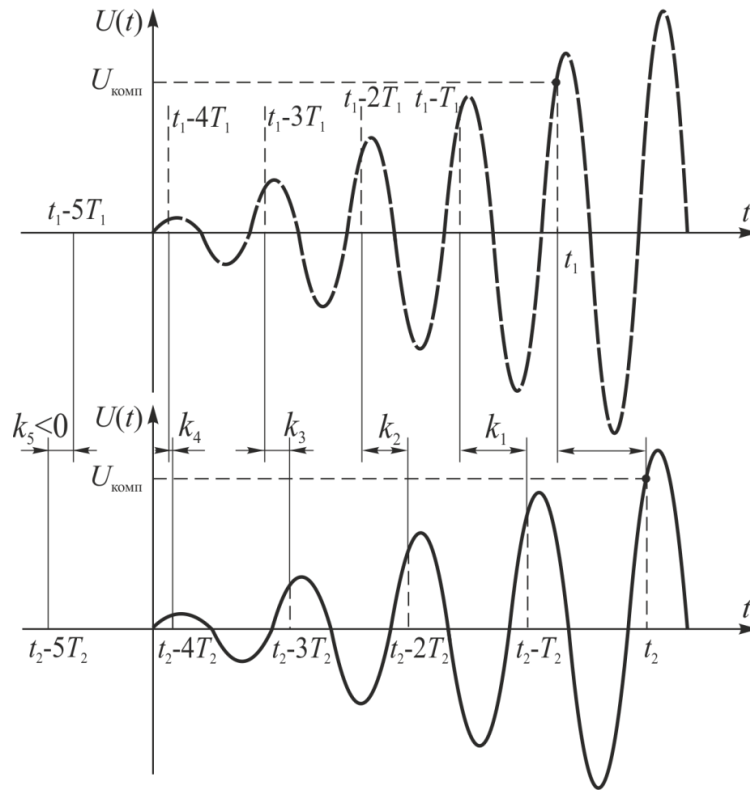


Рисунок 1 – Диаграммы, иллюстрирующие принцип нахождения первого периода эхо-сигналов (сплошная линия – эхо-импульс частотой f_1 , пунктирная линия – эхо-импульс частотой f_2)

4) *Определение номера наименьшего положительного элемента итерационной матрицы, т.е. числа n .*

5) *Определение фазы сигнала, при которой амплитуда эхо-сигнала превысила пороговый уровень.*

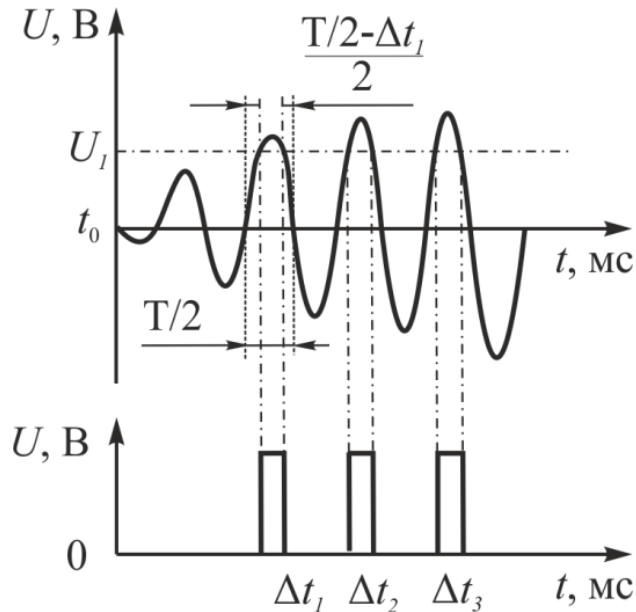


Рисунок 2 – Диаграмма начала эхо-сигнала (а) и зависимость длительности импульсов на выходе компаратора от амплитуды эхо-сигнала (б)

Фазу эхо-сигнала, в которой амплитуда эхо-сигнала превысила пороговый уровень и произошло срабатывание порогового устройства, можно определить из сигналов на его выходе (рисунок 2):

$$\varphi_1 = \pi \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\Delta t_1}{T_1} \right),$$

где Δt_1 – длительность импульсного сигнала на выходе порогового устройства;
 T_1 – период эхо-сигнала.

6) *Вычисление временной координаты начала эхо-сигнала согласно формуле:*

$$t_0 = (t_1 - n \cdot T_1) - \left(\frac{T_1}{4} - \frac{\Delta t_1}{2} \right), \quad (3)$$

где n – номер периода, в котором произошло срабатывание порогового устройства;

T_1 – период эхо-сигнала;

t_1 – временная координата срабатывания порогового устройства.

Максимальная погрешность двухчастотного способа зондирования составляет $T_1/4$, что несомненно превосходит все остальные методы. Определение фазы сигнала, в которой произошло срабатывание компаратора по сигналу на его выходе, позволит существенно повысить точность двухчастотного зондирования.

Для исследования возможностей предложенного способа была разработана в программном пакете Delphi математическая модель акустического тракта ультразвукового эхо-импульсного дефектоскопа.

Интерфейс оператора состоит из двух вкладок: «Графики» и «Погрешности». Вкладка «Графики» представлена на рисунке 3.

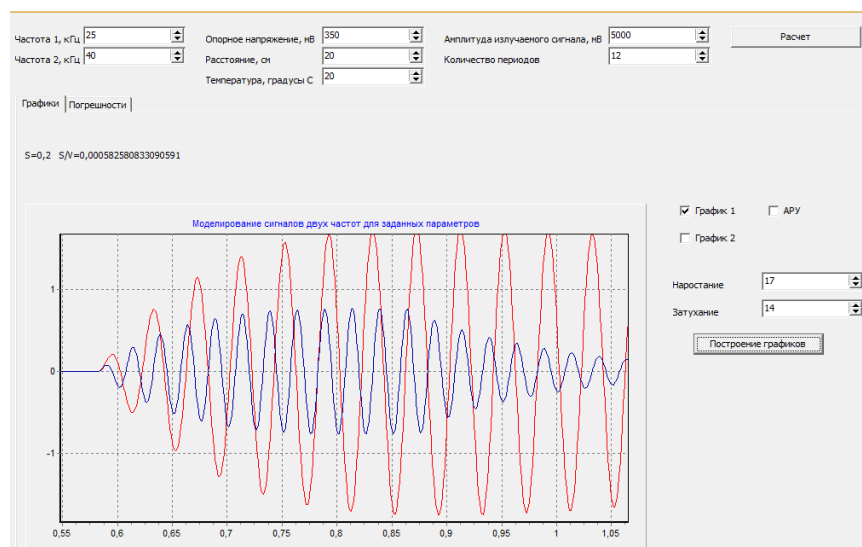


Рисунок 3 – Вкладка «Графики» интерфейса оператора

Графы «Частота 1, кГц» и «Частота 2, кГц» предназначены для задания первой и второй частоты зондирования соответственно. Графа «Опорное напряжение, мВ» позволяет регулировать опорное напряжение, по достижению которого будут определяться моменты времени t_1 и t_2 .

Графа «Расстояние, см» задает расстояние между излучателем и приемником, для которого будет проведено моделирование сигналов. Графа «Температура, градусы С» задает температуру окружающей среды, что позволяет скорректировать скорость распространения ультразвука для вычислений. Графа «Амплитуда излучаемого сигнала, мВ» позволяет задаться амплитудой сигнала, подаваемого на излучатель. Увеличение амплитуды дает возможность увеличить диапазон измеряемых дистанций. Графа «Количество периодов» задает длительность сигнала возбуждения.

Вкладка «Графики» предназначена для вывода результата моделирования сигналов двух разных частот. По заданным на панели управления значениям проводится моделирование и вычисление расстояния до объекта контроля в соответствии с заданными значениями параметров.

Дополнительные окна позволяют откорректировать коэффициенты нарастания и затухания сигнала. Они применялись для верификации математической модели. Определение коэффициентов затухания и нарастания сигнала для определения формы принятого сигнала произведено на основе сравнения моделированных сигналов с реальными сигналами. Для верификации модели использованы сигналы, полученные на различном расстоянии для частот: 25 кГц, 40 кГц, 80 кГц, 100 кГц, 200 кГц, 300 кГц.

На рисунке 4 показаны графики реальных сигналов и сигналов, полученных на основе математического моделирования на частоте 25 кГц, расстояние до объекта контроля 40 см и 50 см, количество периодов зондирующего сигнала 20 и 2. Результаты сравнения формы экспериментальных и расчетных эхо-сигналов показывают их хорошее совпадение.

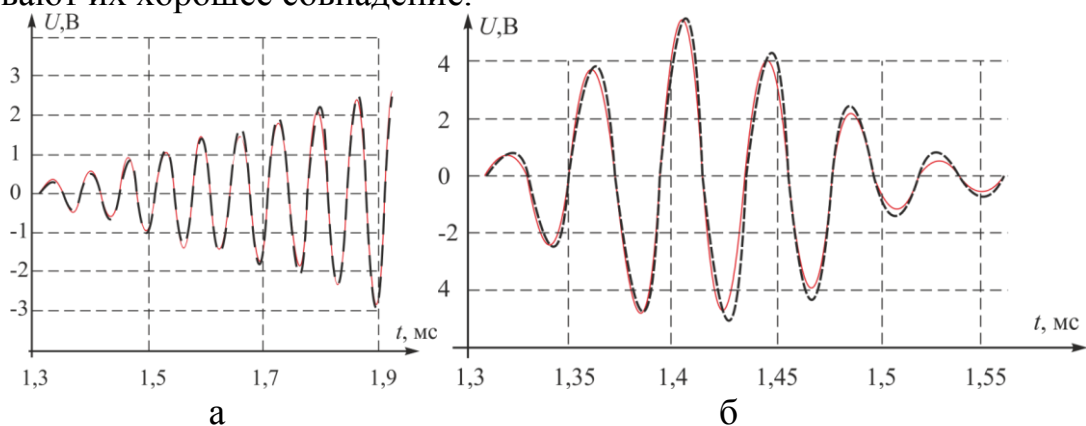


Рисунок 4 – Эхо-сигналы, полученные на экспериментальной установке и с помощью модели, частота 25 кГц, расстояние до объекта контроля а – 40 см, б – 50 см. Красная сплошная линия – эксперимент, черная пунктирная – модель

При применении двухчастотного зондирования необходимо определить частоты сигналов, которые будут использованы для контроля. С одной стороны, чем ближе частоты друг к другу по значению, тем больше вероятность того, что

срабатывание компаратора произойдет в одинаковых по номеру периодах для эхо-сигналов разных частот, с другой стороны излучение ультразвукового сигнала в воздух целесообразно производить серийно выпускающимися современной промышленностью датчиками, имеющими фиксированную частоту излучения.

Выбор коэффициента усиления для каждого канала позволит получить одинаковую амплитуду одноименных периодов эхо-сигналов разных частот. Однако даже абсолютное равенство амплитуд сигналов разной частоты не исключает вероятность срабатывания компаратора в разных периодах. При выборе порогового напряжения, совпадающего по уровню с амплитудой периода, при дискретизации сигналов возникает вероятность проскока срабатывания компаратора на следующий период для одного из сигналов. Результаты моделирования продемонстрированы на рисунке 5.

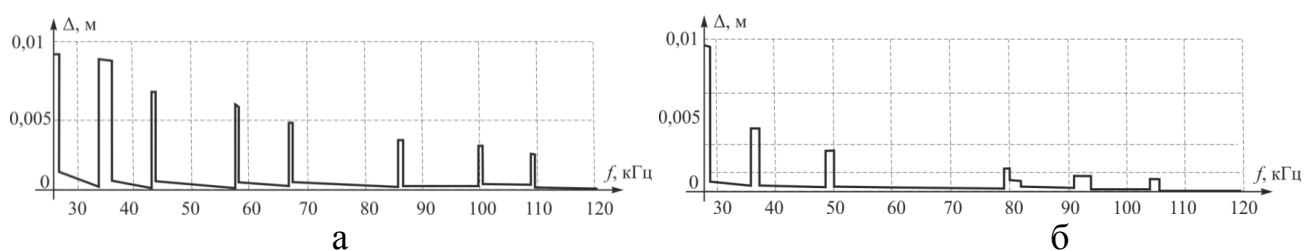


Рисунок 5. Зависимость погрешности контроля от частоты с настройкой коэффициента усиления для каждого канала, дистанция 1 м, $f_1 = 25$ кГц, а - $U_{\text{пор}}/U_{\text{max}} = 0,1$, б - $U_{\text{пор}}/U_{\text{max}} = 0,3$

Из рисунка 5 становится, очевидно, что излучение частот 25 и 40 кГц позволяют обеспечить наименьшую погрешность контроля.

Проведенные теоретические исследования показали, что исключить срабатывание компаратора в разных периодах сигнала полностью невозможно, поэтому необходимо разработать алгоритм обнаружения и соответствующей корректировки данных.

Исключить случаи влияния на результат обработки срабатывания компаратора в разных по счету периодах сигнала позволит коррекция итерационной матрицы (2). Если $t_2 - t_1 < 0$, необходимо вычесть то количество периодов из временной координаты t_2 , при котором выполнится условие $t_2 - t_1 > 0$.

$$\begin{pmatrix} t_2 - t_1 \\ t_2 - (t_1 - T_1) \\ t_2 - (t_1 - 2 \cdot T_1) \\ \vdots \\ t_2 - (t_1 - j \cdot T_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_j \end{pmatrix}$$

Номер минимального положительного коэффициента p покажет количество периодов разницы между первым и вторым срабатыванием компаратора.

После построения первой итерационной матрицы получим откорректированное значение второй временной координаты $t'_1 = t_1 - j \cdot T_1$, именно относительно нее строится вторая итерационная матрица:

$$\begin{pmatrix} t_2 - t'_1 \\ (t_2 - T_2) - (t'_1 - T_1) \\ (t_2 - 2 \cdot T_2) - (t'_1 - 2 \cdot T_1) \\ \vdots \\ (t_2 - n \cdot T_2) - (t'_1 - n \cdot T_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_0 \\ k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{pmatrix}$$

Результаты расчета погрешности определения глубины залегания дефекта при введении корректировки в алгоритм и при ее отсутствии показан на рисунке 6. Из рисунка 5 видно, что погрешность уменьшилась в 4 раза.

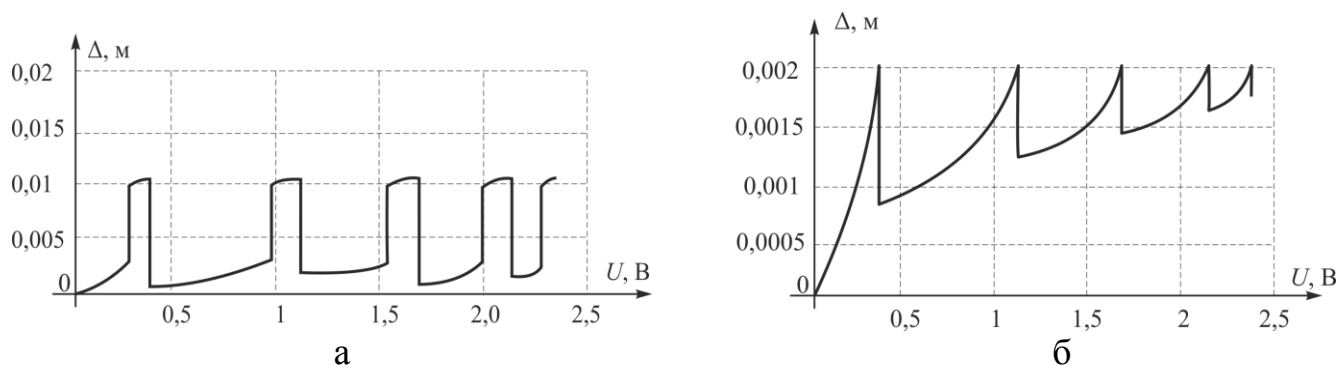


Рисунок 6 – Графики зависимости погрешности измерения от порогового напряжения компаратора до (а) и после (б) выполнения коррекции результата

После реализации нового итерационного алгоритма погрешность способа будет определяться только погрешностью определения фазы сигнала, в который произошло срабатывание компаратора. Результаты расчета погрешности определения глубины залегания дефекта от порогового напряжения компаратора с использованием фазовой коррекции, показаны на рисунке 7. Периодический характер зависимости с увеличением порогового напряжения обусловлен изменением номера периода эхо-сигнала, в котором сработал компаратор.

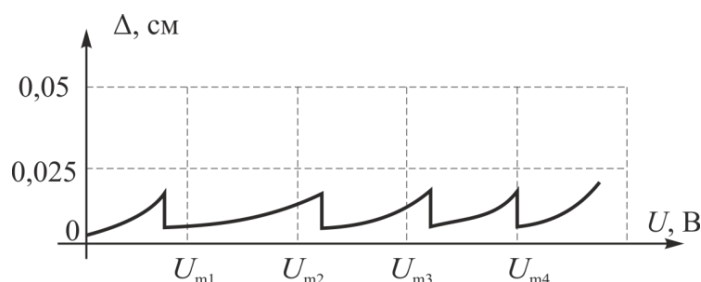


Рисунок 7 – График зависимости погрешности измерения от порогового напряжения компаратора после фазовой коррекции

В ходе лабораторных испытаний была исследована погрешность контроля дистанции при изменении расстояния до объекта контроля. Результаты лабораторных исследований приведены на рисунке 8. Увеличение погрешности при экспериментальном исследовании связана с наличием шумов в акустическом и электронном трактах, а также дискретному измерению длительности импульса

на выходе компаратора, что привело к увеличению погрешности определения фазы.

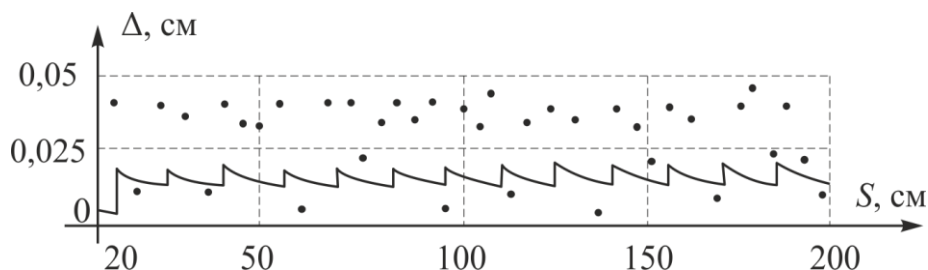


Рисунок 8 – Зависимость погрешности контроля от расстояния до объекта контроля. Сплошная линия – теоретический график, точки - эксперимент

В третьей главе описана экспериментальная установка и представлены результаты экспериментов. Экспериментальная установка, содержит персональный компьютер, электронный блок и акустический тракт состоящий из акустической решетки и объекта контроля. Акустическая решетка состоит из 8 преобразователей работающих на частоте 40 кГц и 8 преобразователей с резонансной частотой 25 кГц, расположенных в два ряда. Электронный блок состоит из микроконтроллера, который управляет работой всех устройств, двухчастотного модуля обработки эхо-сигналов, интерфейса связи с персональным компьютером, модуля памяти и индикатора работоспособности каналов (рисунок 9).

Управление дефектоскопом производится от персонального компьютера через интерфейс связи. Информация о высоте паллеты поступает с блока ультразвуковых датчиков через микроконтроллер в ПК. Блок ультразвуковых датчиков закреплен неподвижно, а сканирование осуществляется путем перемещения паллеты относительно блока ультразвуковых датчиков. Из полученных данных микроконтроллер формирует пакет и пересылает его в персональный компьютер. Персональный компьютер производит обработку данных, определяет высоту поддона в первом положении паллеты. Затем ПК выдает команду на передвижение паллеты на один шаг, который может варьироваться в пределах от 10 мм до 10 см в зависимости от требуемой точности и выполняемой задачи.



а



б

Рисунок 9 – Программно-аппаратный комплекс для контроля паллет, а – электронный блок, б – двухчастотная акустическая решетка

После этого новая информация поступает с блока ультразвуковых датчиков через коммутатор в микроконтроллер и затем в ПК. После окончания сканирования паллеты, ПК проводит анализ полученных данных и выдает сообщение на экран монитора о годности или негодности паллеты для информирования оператора. Кроме того ПК формирует пакет данных для управления исполнительными устройствами перемещением паллеты. Бракованные паллеты отправляются на ремонт или утилизацию в зависимости от состояния. Программная реализация выполнена на языке Delphi.

Алгоритм сортировки паллет включает расчет высоты паллеты в 15 точках поперек паллеты и от 12 до 120 точек (в зависимости от выбранного шага сканирования) вдоль паллеты за счет передвижения паллеты по конвейеру. Высота паллеты определяется из выражения:

$$h = H - \frac{t \cdot v}{2}, \quad (4)$$

где h – измеряемое расстояние;

t – время, затраченное акустическим сигналом;

v – скорость акустического сигнала в данной среде;

H – высота установки акустической решетки над конвейером.

После определения высоты паллеты во всех заданных точках производится сравнение расчетного значения с нормированным значением и если будет обнаружен выход расчетного значения за пределы допуска, то вырабатывается сигнал «БРАК» и паллета бракуется. Полученные данные о высоте поддона используются для графической реконструкции поверхности паллеты с целью визуального наблюдения оператором за параметрами паллеты на экране монитора.

В качестве эксперимента был произведен контроль нескольких деревянных поддонов. На рисунке 10а показана фотография поддона с посторонним

предметом в виде бруска и выломанной верхней доской. На рисунке 10б представлен результат контроля этого поддона в виде графика его поверхности.

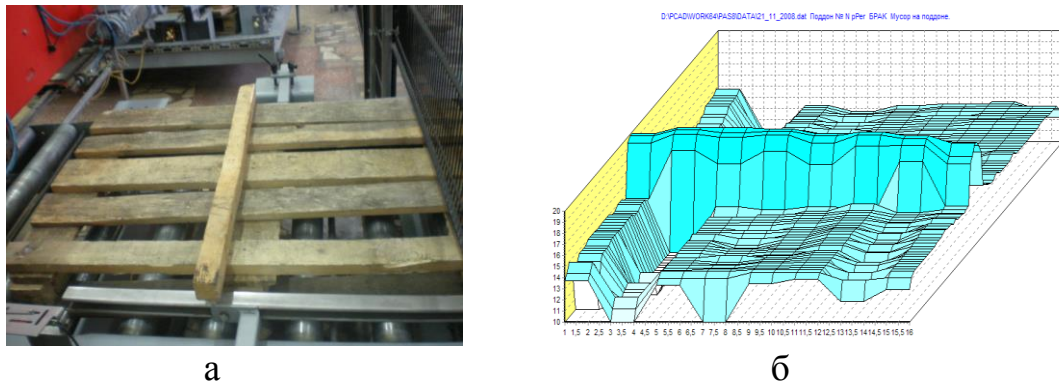


Рисунок 10 - Фотография (а) и график поверхности (б) контролируемого поддона с посторонним предметом в виде бруска и выломанной верхней доской

Из рисунка 10б видно, что посторонний предмет на поверхности паллеты уверенно различим. Кроме того выявилось слишком большое расстояние между двумя соседними конструктивными элементами паллеты и поддон был забракован.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

В приложении приведены результаты внедрения проведенных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации сформулированы и обоснованы основные принципы реализации двухчастотного способа зондирования с фазовой коррекцией для задач неразрушающего контроля геометрических параметров паллет.

Предложенный способ двухчастотного зондирования с фазовой коррекцией позволяет получить погрешность определения временной координаты эхо-сигнала менее 1%.

Проведенные исследования выявили основной источник высокой погрешности контроля при двухчастотном зондировании, заключающийся в срабатывании порогового устройства в разных периодах эхо-сигналов на двух частотах. В диссертационной работе предложен способ определения номеров периодов срабатывания порогового устройства и последующей корректировки временной координаты срабатывания порогового устройства, который позволил получить погрешность контроля менее 0,5 мм.

Для анализа возможностей двухчастотного способа зондирования с фазовой коррекцией разработан программный комплекс, позволяющий моделировать акустический тракт при изменении параметров зондирования, акустического тракта и порогового устройства, что позволяет определять оптимальные параметры дефектоскопа.

Проведенные испытания системы контроля показали ее способность детектировать дефекты различного характера (наличие посторонних предметов, отсутствие досок паллета, сколов и т.д.).

Практическая эксплуатация разработанной системы контроля показала, что разработанная система контроля геометрических параметров паллет имеет достаточно высокую точность, надежность и скорость контроля паллет.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях из списка ВАК РФ

1. Костина М.А. Применение фазового метода для определения временного положения акустического импульса/ М.А. Костина, П.В. Сорокин, А.А. Солдатов // Известия Южного федерального университета. Технические науки : научно-технический и прикладной журнал. – 2010. – Т. 110, № 9. – [С. 97-102].

2. Костина М.А. Алгоритм реконструкции томограммы при теневом методе акустической дефектоскопии линейными решетками/ М.А. Костина, А.И. Солдатов, А.А. Солдатов, П.В. Сорокин, Ю.В. Шульгина// Контроль. Диагностика – 2018 – №2– [С. 42-47].

3. Костина М.А. Малоракурсная акустическая томография при теневом контроле антенными решетками/ М.А. Костина, А.И. Солдатов, А.А. Солдатов, П.В. Сорокин, Ю.В. Шульгина // Дефектоскопия – 2018 – № 7 – [С. 3-9].

4. Костина М.А. Исследование погрешностей измерений при двухчастотном методе зондирования на основе математического моделирования/ М.А. Костина, А.И. Солдатов, А.А. Солдатов, П.В. Сорокин, Ю.В. Шульгина // Дефектоскопия – 2019 – № 1– [С. 17-22].

Публикации в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и WoS:

1. Костина М.А. Small-Angle Acoustic Tomography under Shadow Testing with Antenna Arrays [Article, Electronic resource] / A. I. Soldatov [et al.]// Russian Journal of Nondestructive Testing – 2018 – Vol. 54, No. 7 – [P. 463–468].

2. Костина М.А. Investigating Measurement Errors in Dual-Frequency Probing Technique by Mathematical Modeling [Article, Electronic resource] / A. I. Soldatov [et al.]// Russian Journal of Nondestructive Testing – 2019 – Vol. 55, No. 1 – [P. 15-21].

3. Костина М.А. Acoustic tomography of composite materials of the through-transition method [Book Chapter, Electronic resource] / A. I. Soldatov [et al.]// Materials Science Forum– 2018 – Vol. 938, No. 1 – [P. 75-80].

4. Костина М.А. Management of in-tube projectiles using acoustic channel [Electronic resource] / S.I. Bortalevich [et al.] //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 2018 – Vol. 327 – [042055, 9 p.].

5. Костина М.А. Simulation of the propagation of elastic waves through multilayer structures [Electronic resource] / A. I. Soldatov [et al.]// Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings - [8337218, P. 1-4].

6. Костина М.А. Small-angle tomography algorithm for transmission inspection of acoustic linear array [Electronic resource]/ A. I. Soldatov [et al.]// MATEC Web of Conferences – 2016 – [03006, 7 p.].
7. Костина М.А. Simulation of surface oscillation of ultrasound sensor based on piezoelectric semiconductor transducer [Electronic resource]/ A. I. Soldatov [et al.]// Journal of Physics: Conference Series. - 2016 - Vol. 671 – [012054, P. 1-6]
8. Костина М.А. Influence of the echo shapes on the result of tomographic image [Electronic resource] / P. V. Sorokin [et al.] // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Russia, Omsk, May 21-23, 2015 : proceedings. – IEEE, 2015. – [4 p.].
9. Костина М.А. Software-hardware system for measurement of the pallet dimensions [Electronic resources]/ P. V. Sorokin [et al.] // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). : IEEE, 2017. – [P. 1–5].
10. Костина М.А. System for automatic sorting of pallets[Electronic resources]/ P. V. Sorokin [et al.]// 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON).: IEEE, 2016. С. 1–4.
11. Костина М.А. Inaccuracy of acoustic measurements in dual-frequency method of sounding/ М.А. Kostina, Y.V. Shulgina, A.I. Chudinova// MATEC Web of Conferences – 2018
12. Костина М.А. Simulation of acoustic signals in a waveguide of circular cross section// Mechanical Engineering, Automation and Control Systems: Proceedings of International Conference, Tomsk, December 1-4, 2015. – Tomsk: TPU Publishing House, 2015 – p. 1-4.
13. Костина М.А. Distance determination based on dual frequency method with phase correction // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 – Proceedings. 29-30 June 2017.

Патенты

1. Патент RU 2 599 602 C1 «Способ компенсации погрешности измерения ультразвукового локатора» по заявке № 2015122824/28 от 15.06.2015, опубл. 10.10.2016, Бюл. № 28/ Солдатов А.И., Шульгина Ю.В., Солдатов А.А., Сорокин П.В., Костина (Солдатова) М.А.
2. Патент RU 2 596 907 C1 «Устройство компенсации погрешности измерения ультразвукового локатора» по заявке №2015122093/28 от 09.06.2015, опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25 / Солдатов А.И., Шульгина Ю.В., Солдатов А.А., Сорокин П.В., Костина (Солдатова) М.А., Шульгин Е.М.
3. Патент RU 2 679 647 C1 «Способ ультразвуковой томографии» по заявке № 2018120253 от 31.05.2018, опубл. 12.02.2019, Бюл. № 5 / Солдатов А.И., Шульгина Ю.В., Солдатов А.А., Сорокин П.В., Костина М.А. и др.
4. Патент RU 2 679 648 C1 «Устройство ультразвуковой томографии» по заявке № 2018120256 от 31.05.2018, опубл. 12.02.2019, Бюл. № 5 / Солдатов А.И., Шульгина Ю.В., Солдатов А.А., Сорокин П.В., Костина М.А. и др.