Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

КОСТИНА МАРИЯ АЛЕКСЕЕВНА

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПАЛЛЕТ

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор К.С. Бразовский

Томск – 2019

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1 КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПАЛЛЕТ 11
1.1 Характеристики объекта контроля 11
1.2 Анализ методов контроля геометрических параметров паллет 20
1.3 Приборы контроля геометрических параметров паллет 21
1.3.1 Автоматическая система контроля качества поддонов OCME 21
1.3.2 Система проверки пустых поддонов 25
1.3.3 Лазерный сканер повреждений 27
1.4 Ультразвуковой контроль геометрических параметров паллет 29
1.4.1 Повышение точности при использовании различного порогового напряжения 35
1.4.2 Определение временной координаты начала эхо-сигнала определением координат экстремумов первых периодов 38
1.4.3 Применение фазового метода для определения временного положения акустического импульса 40
1.4.4 Корреляционная обработка принятого сигнала 43
1.4.5 Двухчастотный способ зондирования объекта контроля 44
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХЧАСТОТНОГО СПОСОБА ЗОНДИРОВАНИЯ С ФАЗОВОЙ КОРРЕКЦИЕЙ 47
2.1 Способ двухчастотного зондирования с фазовой коррекцией 47
2.2 Теоретическое исследование способа двухчастотного зондирования с фазовой коррекцией 54
2.2.1 Описание математической модели 58
2.2.2 Исследование влияния соотношения частот на точность определения расстояния 65
2.2.3 Исследование влияния порогового напряжения и измеряемого расстояния на точностные характеристики способа 74
2.3 Детектирование фазы сигнала при двухчастотном зондировании объекта контроля 78

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 90
3.1 Экспериментальная установка 90
3.2 Программный интерфейс дефектоскопа 99
3.3 Расчет концентратора 105
3.4 Алгоритм реконструкции поверхности паллеты 114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 125
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 127
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ 141
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТКИ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ТПУ 142

Введение

Актуальность

В наше время трудно представить предприятие массового производства продукции, которое обходятся без транспортировочной и упаковочной 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 довезти до места назначения.

Использование унифицированных поддонов для упаковки продукции, обеспечивает сохранность товара, увеличивает удобство погрузочно-разгрузочных работ, тем самым 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 паллеты могут быть повреждены в той или иной степени, что может привезти к необратимой порче произведенного товара. Нарушение геометрических параметров паллет приводит к отклонению в работе устройства автоматической укладки выпускаемой продукции, при этом для устранения аварийной ситуации необходим некоторый период время, что приводит к увеличению простоев и издержек производства, что влечет за собой рост себестоимости продукции [1].

Выявление дефектов (целостность конструктивных элементов, отсутствие посторонних предметов, трещин, сколов и т.п) с последующей комплексной оценкой качества паллет и оперативное принятие верного решения для их устранения с конвейерной ленты представляют собой сложнейшую задачу для оператора.

Разработка нового оборудования для оперативного определения дефектной транспортировочной тары позволит осуществлять отбор поддонов без каких-либо

повреждений и отклонений от нормы, что в свою очередь приведет к снижению себестоимости выпускаемой продукции.

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 схемотехнические 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 локатора.

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 частотах зондирования 25 и 40 кГц при любом соотношении пороговых напряжениях 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 уменьшить простои производства, обусловленные использованием бракованных паллет на линии упаковки.

Результаты диссертационного исследования нашли применение в учебном процессе национального исследовательского Томского политехнического университета Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности в разделе «Акустические методы контроля» учебного курса «Электронные промышленные устройства», а также при подготовке выпускных квалификационных работ 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.

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 главе I диссертационной работы дается описание объекта контроля, существующих методов и средств измерений. Особое внимание уделяется методам определения временной координаты начала прихода принятого импульса.

Во второй главе приводиться описание математической модели акустического сигнала, на основе которой проведен анализ погрешностей измерений для различных случаев: разного соотношения частот, изменение порога срабатывания компаратора, зависимость погрешности от расстояния до объекта контроля.

В третьей главе описывается практический опыт, полученный в ходе проведения исследований. На основе полученной математической модели, описанной во второй главе, был разработан прибор, описание которого приводиться в третьей главе.

Глава 1 Контроль геометрических параметров паллет

1.1 Характеристики объекта контроля

Деревянные поддоны получили свое распространение с развитием производства, торговли и увеличением объема грузоперевозок в начале 20 века. Паллета или поддон (паллет) представляет собой подставку под груз прямоугольной формы. Используют поддоны для перевозки грузов водным путем, железнодорожным и автомобильным транспортом. Поддоны удобно транспортировать, снимая или подавая их на транспорт различными видами грузоподъемных устройств. Их перемещают грузоподъемниками (электро-погрузчиками), оснащенными специальными вилами, при помощи которых они осуществляют захват поддона.

Использование паллет экономит время при погрузочно-разгрузочных работах. Поскольку мелкий груз (мешки, коробки) укладывается в несколько рядов на поддоны строго друг на друга, не допуская его свисания за контуры паллет. В результате на поддон помещается не один десяток перемещаемого товара. Благодаря такой укладке, товар не деформируется и не повреждается.

Виды поддонов

Существует 4 вида поддонов:

1. **Деревянные поддоны**



Рисунок 1.1 – Паллеты из дерева

В основном деревянные паллеты изготавливают из древесины, которая предварительно обрабатывается специальными средствами, в том числе термическая, при которой уничтожаются вредные микроорганизмы. Производство паллет из дерева имеет невысокую стоимость, требует небольших финансовых и временных затрат. При производстве паллет различной грузоподъемности и прочности, что имеет первостепенное значение при перевозке грузов большой массы, используют различные породы дерева. Готовые паллеты, прошедшие все виды обработки, маркируют согласно норм конвенции IPPC, что подтверждает их санитарную обработку.

2. **Поддоны из рифленого картона**



Рисунок 1.2 – Паллеты из гофрокартона

Небольшую нишу занимают паллеты из гофрокартона, которые удобно использовать при перемещении товаров на значительные расстояния. Однако, они обладают одним существенным недостатком - они влагопроницаемы. Поэтому они предназначены для однократного использования, после чего утилизируются.

3. Пластиковые поддоны



Рисунок 1.3 – Паллеты из пластика

Паллеты из пластика превосходят деревянные по массе. Кроме того, они легко моются и обрабатываются специальными дезинфицирующими средствами, что очень удобно и практично. Для производства паллет из пластика применяют различные композитные материалы с различными наполнителями, что позволяет получить паллеты с различными характеристиками. Паллеты из пластика являются наиболее безопасными для применения в любых сферах деятельности. Однако в настоящее время их стоимость достаточно высока и не все потребители готовы их покупать.

4. Паллеты из металла



Рисунок 1.4 – Паллеты из металла

Паллеты из металла способны выдерживать высокую рабочую температуру, именно поэтому они могут использоваться в помещениях с высокой температурой. Паллеты из стали и алюминия более прочные, чем паллеты из дерева, картона или пластика, поэтому они используются для перевозки тяжелых грузов. Однако для перемещения грузов на значительные расстояния они практически не используются. Их основное назначение: внутреннее перемещение продукции на технологической линии производства.

Деревянные поддоны сегодня - важный инструмент в производственных, складских, торговых и логистических операциях. В настоящее время трудно представить производственное или коммерческое предприятие, которое не использует поддоны, в то время как большинство предприятий используют деревянные поддоны. Использование деревянных поддонов связано, прежде всего, с экономической целесообразностью, связанной со сложностью возврата контейнеров от клиентов, особенно при перемещении продукции на значительные расстояния.



Рисунок 1.5 – Транспортировка поддонов

Мировая практика использования деревянных паллет показывает, что зачастую паллеты не утилизируются после первого или второго использования.

Если паллеты изготовлены качественно и аккуратно используются, их можно применять многократно. Поэтому рынок деревянных паллет разделен на два смежных сегмента с высоким оборотом – новые паллеты и использованные паллеты. На рынке появились компании, которые заняты сбором бывших в употреблении паллет, их ремонтом, предпродажной подготовкой и реализацией. При этом стоимость паллет существенно снижается. По техническому состоянию бывшие в употреблении паллеты делятся на три сорта:

Высший сорт

- практически новые, крепкие, белые паллеты;
- без трещин и сколов;
- использованы не более трех раз.

Первый сорт

- крепкие, белые паллеты;
- без трещин и сколов;
- не подвергались ремонту.

Второй сорт

- допускаются небольшие загрязнения и потемнение древесины от времени;
- допускаются небольшие сколы и трещины (не более 30см в длину и 3см в ширину);
- часть паллет может быть после ремонта.

Нормативный срок службы паллет определяется стандартом, однако условия эксплуатации сильно влияют на его продолжительность. При больших динамических нагрузках поддон может прослужить не более полугода. Если интенсивность использования паллет низкая, например, паллета установленная с продуктом на стеллаж может простоять там три-четыре года, при этом паллета, изготовленная из дерева, со временем только потемнеет, но не потеряет своих свойств, то срок ее службы существенно увеличивается. Поэтому целесообразно измерять срок их службы количеством логистических циклов. Стандартный

европоддон высокого качества выдерживает от 7 до 8 циклов, что соответствует нормативным требованиям европейского стандарта, аналогичного российскому ГОСТу, в которых указаны рекомендации по использованию паллет в течение этих циклов, после чего требуется их замена. Количество циклов может быть увеличено, если паллет сохранил свои свойства.

Наиболее высокие требования к техническим характеристикам паллет предъявляются при использовании паллетизаторов - устройств, которые упаковывают готовую продукцию на паллеты с помощью пленки или ленты. Паллетизаторы находят широкое применение при упаковке мелкоразмерной продукции (банки, бутылки, консервы т.д.). Паллеты, используемые в паллетизаторе, должны иметь малые допуски к габаритным размерам. Отклонение размеров паллет более чем на 3 ... 4 мм приводит к зависанию программы управления паллетизотором и остановке линии упаковки. Поэтому качество поддонов, применяемых в такой технологии, должно быть очень высоким.

Изготовление поддонов в России регламентируется двумя основными документами: ГОСТ 9557-87 и ГОСТ 9078-84 [2, 3]. При этом ГОСТ 9078 имеет слишком общий характер и регламентирует факт существования поддонов, которые изготавливаются из деревянных конструктивных элементов. Он не указывает на жесткую привязку размеров и толщины используемых досок, а также количеству крепежных элементов. Он регламентирует только габаритные размеры самой паллеты – 1200х800 и 1200х1000 мм. В рамках этих двух габаритов ГОСТ допускает использование конструктивных элементов любых размеров.

ГОСТ 9557 похож на европейский стандарт UIC 435-2, который регламентирует производство европоддонов [4]. Основное отличие паллет отечественного изготовления от стандарта UIC 435-2 является отсутствие маркировки EUR и EPAL. Это связано с отсутствием европейской сертификации наших производителей паллет. Остальные характеристики паллет одинаковы — количество конструктивных и крепежных элементов, толщина, допуски и фаски.

Поэтому в России появились паллеты маркированные клеймом «БК» (без клейма) — не сертифицированные аналоги европоддона.

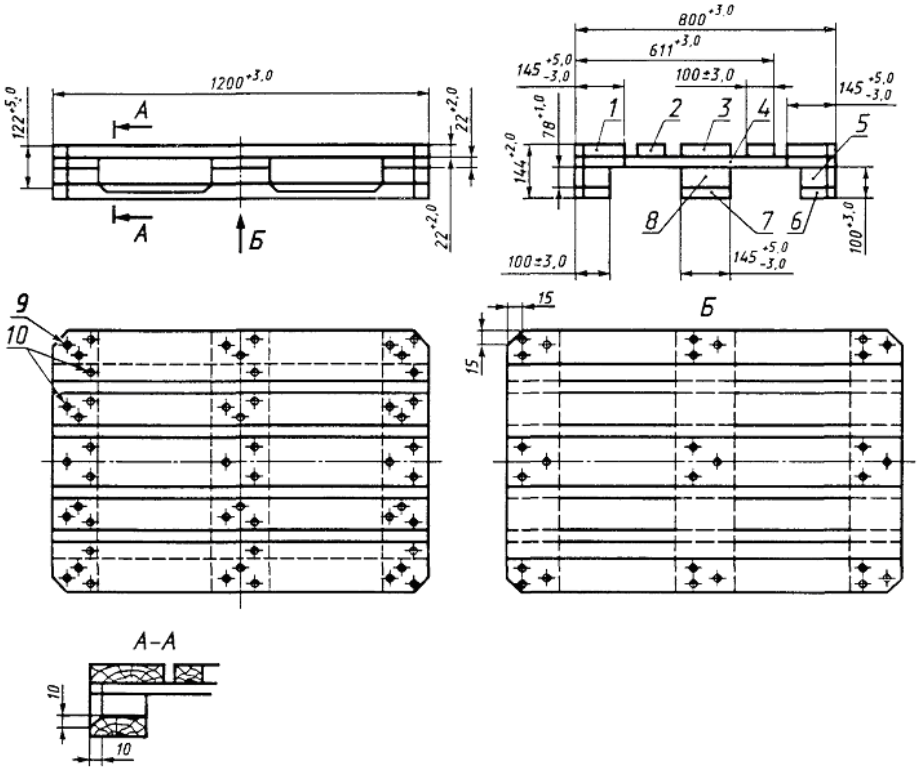


Рисунок 1.6 – Паллет по ГОСТ

При эксплуатации возможно повреждение паллет в той или иной степени. При отсутствии трещин, сломов, сколов, которые снижают прочность, паллету считают пригодной для использования. Незначительные дефекты: сломанные конструктивные элементы, выступающие крепежные элементы, нарушение геометрии, легко устраняются потребителями поддонов на своей территории [5].

Конструкция поддона

Поддоны могут отличаться по размеру, но конструкция их всегда остается примерно одинаковой. Деревянный поддон состоит из следующих элементов:

- Настил - Поверхность поддона, на которой размещается груз. Настил состоит из крайних и промежуточных досок.

- Шашки – основной связующий элемент поддона. Девять шашек расположены между настилом и основными досками поддона и формируют пространство для захвата поддона вилами гидравлической тележки, погрузчика.
- Поперечные доски – Три несущие доски, связывающие настил и шашки поддона. Являются составляющей частью поддона, испытывающей максимальные нагрузки при размещении груза на поддоне.
- Нижние доски – доски, формирующие нижнюю поверхность поддона. Наиболее типична конструкция поддона с тремя основными досками.

Толщина досок настила и частота их размещения зависят от вида груза, но конструкция их в общей сложности всегда одинакова – составлена таким образом, чтобы погрузчик мог захватить поддон со всех сторон.

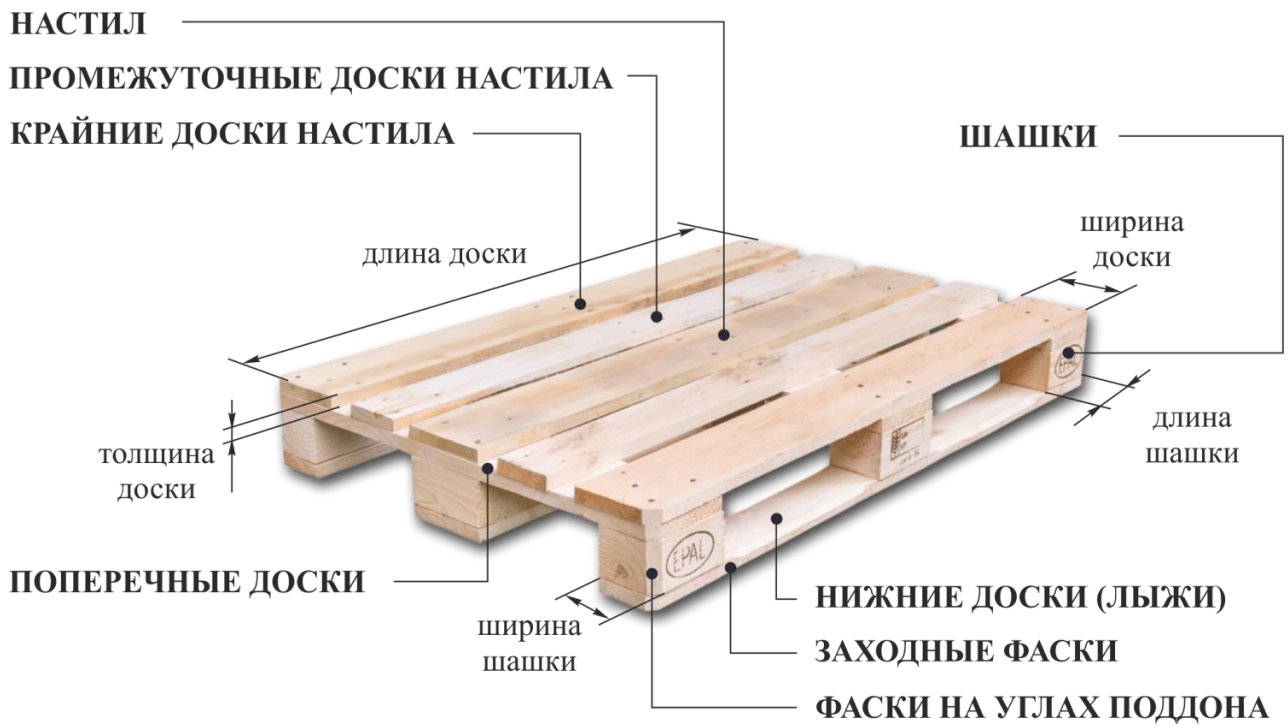


Рисунок 1.7 – Конструкция поддона

Для принятия решения о дальнейшем использовании бывшего в употреблении поддона, необходимо выработать критерии, на основе которых принимается решение о утилизации или дальнейшем использовании паллеты. Во-первых: наличие всех девяти шашек, на которых закреплен настил. Если хотя бы одна из них отсутствует, паллета считается бракованной. Тем не менее такая

паллета подлежит восстановлению, при установке шашки на место. Прочность конструкции определяется целостностью конструктивных элементов, к которым относятся доски. Наличие трещин и сколов до гвоздя уменьшают прочность паллеты. Наличие трещин на деревянных элементах конструкции обычное явление, но небольшие трещины не оказывают существенного влияния на прочность паллеты. Скол до гвоздя является существенным дефектом, а паллеты со сколами доски, из которой торчит часть гвоздя, запрещены к использованию, из-за возможного повреждения продукции, хранящийся на паллетах, или возможности нанесения травмы персоналу, поэтому паллета не должна иметь торчащих гвоздей на настильной стороне.

Паллеты, рассчитанные на низкую грузоподъемность подлежат ремонту в зависимости от их состояния. Если поддон не очень старый, что косвенно можно определить по цвету древесины (она темнеет с течением времени – таково свойство древесины), то он подлежит ремонту. Если поддоны старые, то не имеет смысла их ремонтировать, поэтому их утилизируют. Такая работа выполняется специализированными организациями.



Рисунок 1.8 – Транспортировка поддонов по конвеерной ленте

1.2 Анализ методов контроля геометрических параметров паллет

Для детектирования внутренних дефектов материалов, применяемых для изготовления поддонов можно использовать разнообразные методы неразрушающего контроля (НК) [6, 7], основанные на различных физических принципах.

Однако, большинство из них обладает определенными недостатками [8, 9, 10], которые зачастую не позволяют выявить все имеющиеся дефекты паллеты. Для детектирования к макро и микродефектов внутренней структуры материала паллеты необходимо обеспечить высокие требования по разрешающей способности метода НК, что позволит точно определить координаты дефектов [11]. В таблице 1.1 приведен сравнительный анализ методов неразрушающего контроля.

Таблица 1.1 – Сравнительный анализ методов неразрушающего контроля

Метод	Преимущества	Недостатки
Визуально-измерительный	Не требующий какого-либо оборудования метод неразрушающего контроля – может реализовываться с помощью простых измерительных средств	Низкая точность и скорость обнаружения мелких поверхностных дефектов Уровень выявляемости дефектов приборами зависит от субъективных факторов
Оптический	Простота оборудования, широкое применение, обеспечение безопасности персонала, низкие временные затраты на проведение контроля [12, 13]	Очень малая глубина выявляемых дефектов и точность их размеров. Низкая освещенность и запыленность помещения снижают точность метода
Акустический	Простые и недорогие приборы, возможность обнаружения более глубоко находящихся дефектов [14, 15, 16, 17].	Большая зависимость от температуры, влажности среды распространения акустических волн.
Тепловые	Возможность контроля состояния протяженных поверхностей в ходе технологического процесса [18, 19].	Специфические помехи, по природе связанные с неоднородностями излучения тепловой волны, малая точность определения размеров и формы дефектных зон.
Радиационные	Возможность контроля состояния внутренней структуры паллет, достаточно высокая четкость 2D изображения, малые размеры установки для контроля [20].	Необходимость подхода к ОК с обеих сторон, относительно малая производительность, высокая стоимость компонентов (серебро), рентгеновское излучение, высокая стоимость оборудования

Выше приведенные методы НК позволяют выявить основные виды дефектов: внутренней структуры материала, поверхностные повреждения, сколы, плохое крепление элементов конструкции, наличие посторонних предметов на

поверхности поддонов, что возможно за счет получения двумерных томограмм [21].

Таким образом, проведенный анализ различных источников позволил оценить текущий уровень развития ультразвукового контроля в качестве метода контроля геометрических параметров деревянных паллет применяемых в различных отраслях промышленности [22, 23, 24].

1.3 Приборы контроля геометрических параметров паллет

1.3.1 Автоматическая система контроля качества поддонов OCME

Одной из важнейших областей обеспечения эффективной упаковки является поставка качественных пустых поддонов в зону паллетирования. Это может быть трудоемким и сложным процессом из-за того, что некоторые дефекты не могут быть легко выявлены. Чтобы улучшить производительность конвейерной упаковки продукции на поддоны, итальянская компания OCME разработала систему контроля и проверки паллет [25].

Система контроля поддонов предназначена для использования на открытых площадках с температурой не менее + 5 °C или для использования в закрытых помещениях. Для автоматического контроля пустых поддонов функции контроля предлагает модульную систему. Каждый модуль системы на одном этапе контроля контролирует один параметр. Этапы контроля описаны ниже:

- **Проверка поперечных скрепляющих досок**



Рисунок 1.9 – Контроль поперечных скрепляющих досок с помощью фотодатчиков

После выравнивания пустого поддона в обоих направлениях оси, световые датчики проверяют наличие поперечных скрепляющих досок, и есть ли большие сломанные участки на них (рисунок 1.9).

- **Измерение размеров поддона**



Рисунок 1.10 – Контроль габаритных размеров паллет

Когда пустой поддон попадает на контролирующую станцию, любые свободно лежащие предметы сбрасываются, а размеры поддона (длина, ширина,

высота) как показано на рисунке 1.10, проверяются оптическими датчиками на предмет соответствия.

- **Проверка цвета паллет и наличие темных пятен**



Рисунок 1.11 – Контроль цвета паллет

Специальные световые сканеры проверяют отдельно каждую рейку паллеты, это показано на рисунке 1.11. Результат оценивается с точки зрения светлых или темных поддонов. Это можно использовать для определения срока службы поддонов.

- **Выявление выпирающих предметов и торчащих гвоздей**



Рисунок 1.12 – Контроль выпирающих предметов на поверхности поддона

Пневматические или гидравлические прижимные ролики осуществляют выявление на поверхности поддона выпирающих предметов и торчащих гвоздей. Процесс изображен на рисунке 1.12.

- **Проверка зазоров между рейками**

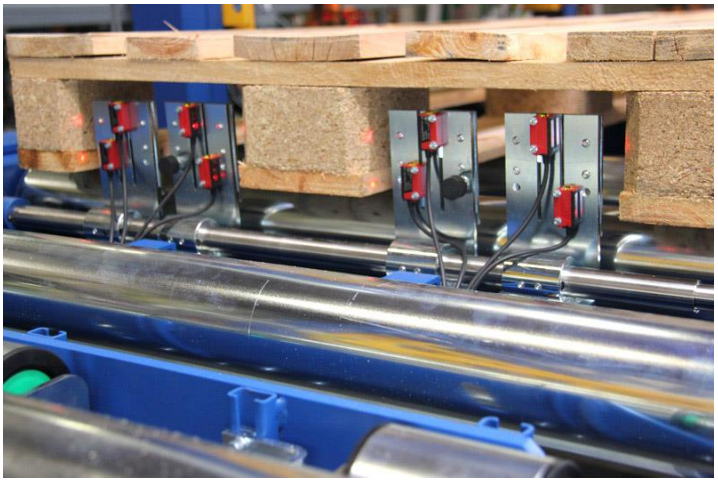


Рисунок 1.13 – Проверка зазоров для вилок погрузчика

Сенсорные панели с бесступенчатым переключением проверяют зазоры между рейками поддона (рисунок 1.13). Бесконтактные датчики оценивают все блоки поддона на наличие больших сломанных участков. Этот участок системы также обнаруживает любые недостающие бруски.

- **Проверка нижних досок**



Рисунок 1.14 – Проверка нижних оснований поддона

Бесконтактные фото-датчики под поддонами осматривают донные рейки на присутствие поврежденных участков. На рисунке 1.14 изображен общий вид датчиков. Также тестируется поддон на прочность. С помощью пресса на каждую доску паллета оказывается давление. Если одна из досок не проходит этот тест, то поддон классифицируется как «дефектный» [26].

Система контроля поддонов OCME представляет собой систему с одним проходом, которая использует прижимные ролики для обнаружения трещин или сломанных досок и отбрасывает не стандартные поддоны. Типичная система OCME является высоко габаритной и включает в себя целый ряд дорогостоящих узлов: укладчик поддонов, подающие и выходные конвейеры, систему отбраковки и систему интеграции [27].

1.3.2 Система проверки пустых поддонов

Немецкая компания KÖHL предлагает полностью автоматизированную систему контроля, которая превосходит текущие рыночные требования. Эта система проверяет евро поддоны на их прочностную способность, на наличие дефектов и отклонений от заданных размеров. Индивидуально настраиваемые критерии сортировки позволяют правильно оценивать и сортировать поддоны в соответствии с их предполагаемым использованием. Система может проверять до 365 евро поддонов на линии в час, в зависимости от конфигурации модуля [28].

Технология управления

Установка имеет ручное управление, полуавтоматическое или полностью автоматическое. Параметры для проверки поддона изображены на экране визуализации. Любые отклонения от заданных параметров анализируются на ПК. Если отклонение превышаю определенный диапазон допустимых отклонений, то система устанавливает код ошибки для соответствующего поддона и на экране отображается конкретная ошибка. Критерии проверки можно настроить индивидуально в любой момент времени, что обеспечивает высокую степень гибкости.



Рисунок 1.15 – Общий вид пневматических прижимных роликов

В приведенной установке для определения геометрических размеров поддонов используются пневматические или гидравлические прижимные ролики, как и в системе контроля, разработанной итальянской компанией OCME (рисунок 1.15). Расстояния между досками определяются с помощью лазерных датчиков (рисунок 1.16).



Рисунок 1.16 – Лазерные датчики для определения расстояния между досок

Основные характеристики:

- Подходит для контроля всех промышленных типов поддонов, включая евро-поддоны, поддоны 600 x 400, 800 x 600;
- Полностью автоматическая система без вмешательства оператора;
- Может обнаружить недостающие доски, выступающие доски, гвозди.
- Может интегрироваться с другими системами конвейера.

1.3.3 Лазерный сканер повреждений

Разработанная система Бельгийской компанией CHEP позволяет за час проверить до 900 поддонов, размерами как 1200 х 800 мм, так и 1200 х 1000 мм. Благодаря перекрестному расположению датчиков возможен контроль двух габаритных размеров. Контроль происходит следующим образом: паллет движется по конвейеру между двух пар излучателей и приемников светового потока. Не поврежденный поддон с нормальными геометрическими размерами затмевает проходящий свет между излучателем и приемником тем самым не дает попасть свету на приемник. В случае, когда геометрия поддона нарушена, свет проходит от излучателя к приемнику и объект контроля считается бракованным [29].



Рисунок 1.17 – Контроль габаритных параметров паллет лазерным сканером

Верхняя пара излучателя и приемника контролирует верхний ряд досок, нижняя пара соответственно нижние рейки.

В качестве излучателя используется небольшая световая решетка, состоящая из нескольких десятков лазеров, в качестве приемника используется решетка из фотодиодов. На рисунке 1.17 изображен контроль габаритных параметров паллет оптическим методом.

Основным преимуществом системы является малогабаритность, простота реализации, высокая скорость контролируемого процесса. Помимо преимуществ система обладает рядом недостатков.

Недостатком этой системы является то, что установка чувствительна к пыли, образующейся в процессе сортировки и ремонта поддонов. Условия окружающей среды не позволяют полноценно проверить поддоны на отклонения от заданных геометрических параметров. Также система не позволяет выявить дефекты в материале, из которых изготовлены паллет.

1.4 Ультразвуковой контроль геометрических параметров паллет

Для контроля качества древесины широко применяются акустические методы контроля. Акустический контроль древесины является сложной процедурой, поскольку древесина обладает анизотропией акустических свойств, а скорость распространения упругой волны сильно зависит от сорта древесины, типа древесины, возраста и направления расположения волокон относительно направления распространения упругой волны. Кроме того, плотность древесины, ее влажность, наличие в ней дефектов оказывают влияние на величину скорости распространения и коэффициента ослабления упругих колебаний. Чем больше трещин, пустот и дефектов в древесине, тем быстрее затухают акустические колебания.

Акустические методы неразрушающего контроля включают испытания материалов, основанные на регистрации параметров упругих волн, возбуждаемых или возникающих в объекте исследования. Для акустического метода контроля качества используются колебания звукового и ультразвукового диапазонов с частотами от 20 Гц до 30 МГц, которые отправляются на исследуемый объект в импульсном или непрерывном режиме.

Существующие на текущий момент времени методы акустического контроля расстояний можно разделить на активные и пассивные [30].

Активные подразумевают под собой излучение и прием акустического сигнала, в то время как пассивные только принимают его. Для задачи, поставленной в работе применимы активные методы. Их мы рассмотрим далее.

По типу излучения акустические дефектоскопы делятся на приборы с непрерывным и импульсным излучением.

По характеру физических принципов, используемых для измерения толщины, методы акустического контроля делятся [31] на:

- Временной метод (импульсное излучение). Геометрическая величина измеряется по времени прохождения ультразвукового импульса в одну сторону в

изделии или слое. Необходимо располагать источник и приемник на противоположных поверхностях изделия;

- Амплитудный метод (возможен и импульсный, и непрерывный вариант исполнения). Геометрическая величина определяется по амплитуде прошедших через изделие ультразвуковых волн. Сложен в реализации;
- Фазовый метод (непрерывное излучение). Геометрическая величина измеряется по разности фаз излученного и прошедшего через изделие сигнала. Ограничен длинной волны излучаемого сигнала [32];
- Резонансный метод (непрерывное излучение). Геометрическая величина определяется с помощью локального резонансного метода или локального метода свободных колебаний [33] или других интерференционных явлений, возникающих при распространении акустических волн в изделии;
- Эхо-метод (импульсный). Геометрическая величина определяется по времени прохождения сигнала от излучателя до отражателя (в качестве которого выступает противоположная стенка изделия) и обратно.

Из рассмотренных выше методов, наиболее целесообразно использовать эхо-метод, как метод, с более легкой реализацией и позволяющий измерить большие расстояния.

Из рассмотренных выше методов, наиболее целесообразно использовать эхо-метод, как метод, с более легкой реализацией и позволяющий измерить большие расстояния. Принцип функционирования эхо-метода заключается в излучении в объект контроля импульсов упругих волн и регистрации параметров отраженных эхо-сигналов, в частности интенсивности и времени распространения. При этом амплитуда будет пропорциональна отражающей способности дефекта, а время распространения – глубине залегания отражателя [34].

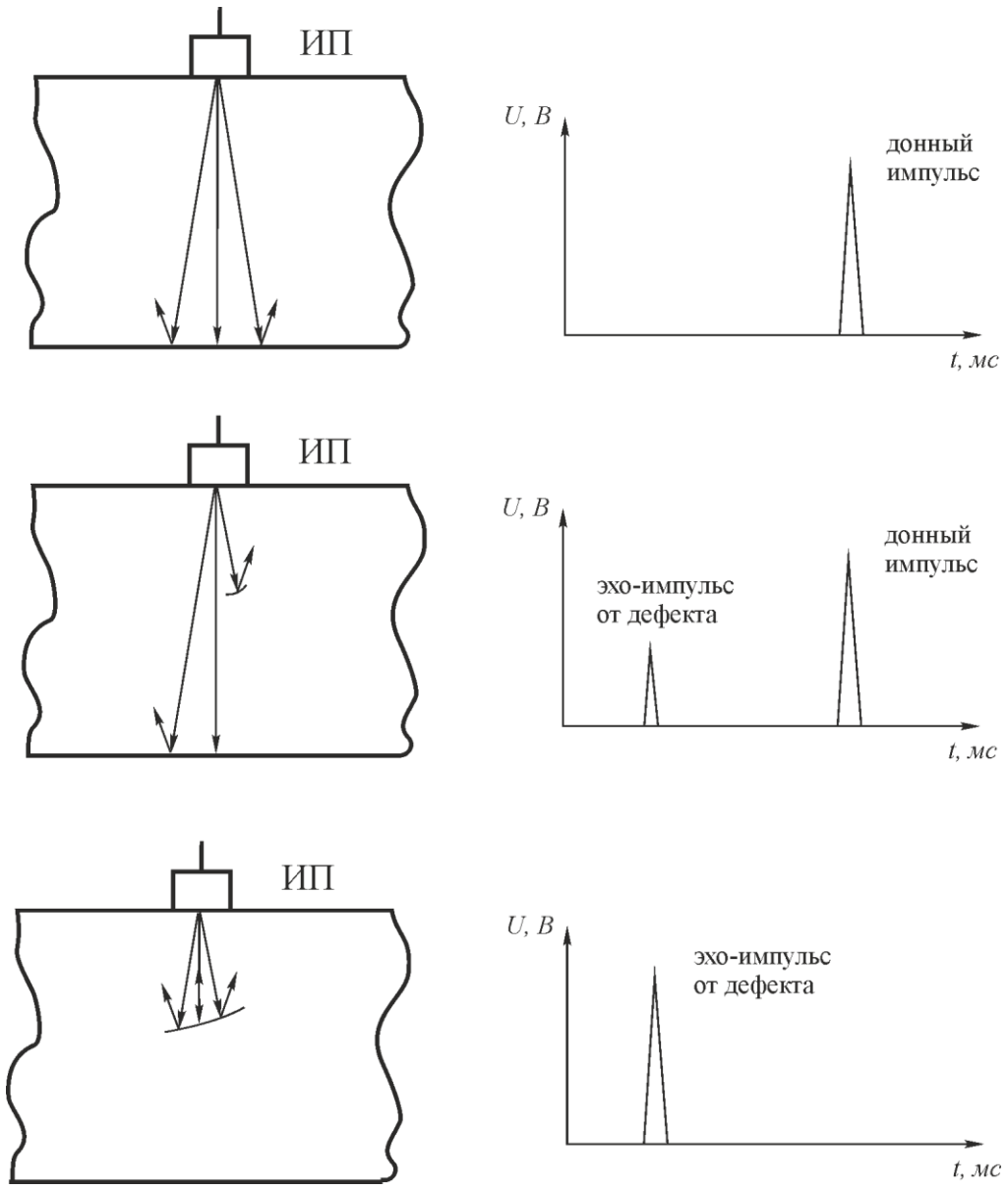


Рисунок 1.18 – Схема контроля эхо-методом прямым ПЭП

Чтобы определить расстояние до обнаруженного объекта, необходимо знать время запаздывания отраженного сигнала относительно излученного. Если скорость *c* распространения ультразвука в объекте известна, то, расстояние определяют по формуле:

$$h = 0,5 \cdot c \cdot t, \qquad (1.1)$$

где h – измеряемое расстояние, м;

c – скорость ультразвука в среде, через которую проходит сигнал, м/с;

t – время прохождения сигнала, с.

С учетом двунаправленного распространения ультразвуковой волны от излучателя к отражателю и обратно, то полученный результат необходимо уменьшить в два раза.

При косвенных измерениях абсолютная погрешность определяется погрешностями каждой из непосредственно измеренных величин, входящих в выражение (1.1):

$$\Delta_h = \frac{\partial h}{\partial c} \cdot \Delta_c + \frac{\partial h}{\partial t} \cdot \Delta_t = \frac{t}{2} \cdot \Delta_c + \frac{c}{2} \cdot \Delta_t = \frac{t \cdot c}{2} \cdot \frac{\Delta_c}{c} + \frac{c \cdot t}{2} \cdot \frac{\Delta_t}{t}. \quad (1.2)$$

Заметим, что левая часть выражения (1.2) содержит общий множитель, который равен расстоянию и его можно вынести за скобку и обозначить h. Тогда в скобках останется два слагаемых, которые соответствуют относительной погрешности измерения скорости и времени. Отсюда получаем:

$$\Delta_h = h \cdot \left(\delta_c + \delta_t \right),$$

Если перейти к относительным единицам, то получим:

$$\delta_h = \delta_c + \delta_t.$$

Результирующая погрешность есть сумма систематической и случайной [35]:

$$\Delta h = \Delta h_{сm} + \Delta h_{сл}.$$

Систематическая погрешность Δh_{cm} определяется как разность между средней величиной h_{cp}, которая получена при путем нахождения среднего значения при множественных измерениях, и ее реальным значением h_u:

$$\Delta h_{cm} = h_{cp} - h_u,$$

Среднее арифметическое значение h_{cp}:

$$\bar{h} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} h_i.$$

Систематическая погрешность всегда имеет знак отклонения, то есть «+» или «–». Систематическая погрешность может быть исключена введением поправки [36].

Случайные погрешности полностью устранить невозможно. Значения их можно уменьшить, принимая меры для большей стабилизации тех факторов, которые оказывают влияние на данную погрешность. Случайную погрешность оценивают ее среднеквадратичным значением δ_h или дисперсией δ_h^2, которая вычисляется по формуле:

$$\delta_h^2 = \overline{(h - h_{cp})^2}.$$

Относительную погрешность косвенного измерения можно определить по формуле:

$$\delta_h = \sqrt{\left(\frac{dh}{dc}\cdot\delta_c\right)^2 + \left(\frac{dh}{dt}\cdot\delta_t\right)^2} = \sqrt{\frac{h^2}{c_{cp}^2}\cdot\delta_c^2 + c_{cp}^2\cdot\delta_t^2}. \qquad (1.3)$$

Первые слагаемые в левой части выражений (1.2) и (1.3) характеризуют погрешности, вызванные нестабильностью скорости распространения упругой волны, а вторые - с погрешностью измерения времени распространения [38].

Расчет скорости распространения упругой волны осуществляют при отсутствии паллеты на конвейере. При этом измеряют время распространения упругой волны до конвейерной ленты и обратно и зная высоту расположения датчика над конвейером определяют скорость распространения ультразвуковых колебаний. Полученную скорость используют в формуле (1.1) для вычисления расстояния.

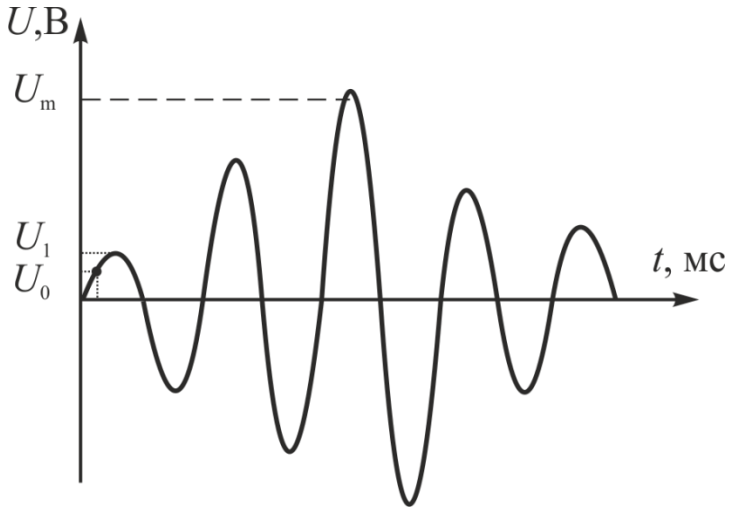


Рисунок 1.19 – Влияние длительности импульса на точность измерений

Во избежание больших ошибок измерение ведут по первому или ближайшему возможному периоду колебаний (рисунок 1.19). Для выполнения этого условия амплитуду импульса U_m поддерживают постоянной, а измерения выполняют на постоянном уровне U_0. Желательно поддерживать постоянной амплитуду первого периода колебаний, однако в техническом отношении это сложнее, чем стабилизация U_m.

Уровень порогового напряжения U_0 необходимо выбирать как можно меньше. В этом случае скорость нарастания наибольшая а величина ошибки минимальная [37]. Однако, данный уровень должен быть выше уровня помех.

Из других причин, вызывающих погрешности измерения, назовем изменение температуры. Оно приводит к изменению скорости распространения упругих колебаний, что компенсируют температурной корректировкой скорости. Зависимость скорости распространения упругих волн от температуры хорошо известна и определяется как [39, 40]:

$$c = c_0 + 0.6 \cdot T_в, \tag{1.4}$$

где c_0 — скорость распространения упругих волн в воздухе при нулевой температуре воздуха, м/с;

0,6 – эмпиричекий коэффициент;

$T_в$— текущая температура воздуха, °С.

Из формулы (1.1) видно, что погрешность увеличивается с уменьшением h. В этом характерная особенность измерения расстояний эхо-методом.

1.4.1 Повышение точности при использовании различного порогового напряжения

Экспериментально скорость ультразвука может быть определена одним из нескольких методов. Можно выделить некоторые из них: метод фиксации времени распространения упругой волны, метод стоячих волн (или метод резонанса), метод аппроксимации огибающей сигнала различными полиномами и фазовый метод. Измерение времени распространения упругой волны осуществляют путем фиксации момента прихода эхо-сигнала. Традиционно для этого применяют пороговое устройство, на выходе которого формируется прямоугольный импульс при превышении амплитуды эхо-сигнала порогового уровня. Время прихода эхо-сигнала совпадает с передним фронтом импульса на выходе порогового устройства. Погрешность этого метода можно учесть, если ни форма, ни амплитуда эхо-сигнала не изменяются. Однако на практике это условие не выполняется и амплитуда и форма эхо-сигнала флуктуируют, что приводит к флуктуации момента фиксации эхо-сигнала и соответственно погрешность

остается непостоянной и учесть ее невозможно. Системы автоматической регулировки усиления (АРУ) позволяют поддерживать амплитуду эхо-сигнала неизменной, однако, если форма эхо-сигнала изменяется, то ни АРУ, ни компаратор не способны решить проблему высокой погрешности определения времени распространения эхо-сигнала [41].

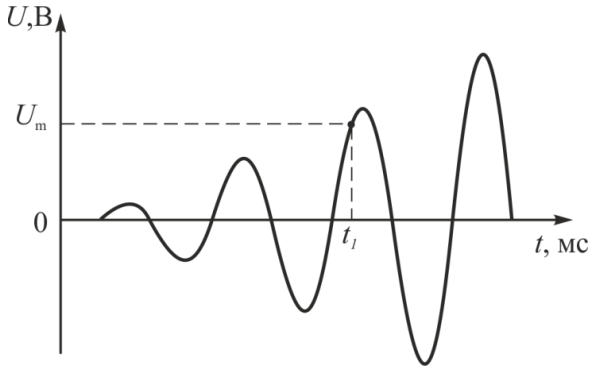


Рисунок 1.20 – Принцип детектирования эхо-сигнала пороговым устройством

Существенное повышение точности измерений обеспечивает метод двух компараторов с разными пороговыми уровнями [42]. Моменты срабатывания первого и второго пороговых устройств будут разными. Временная координата начала эхо-сигнала определяется точкой пересечения прямой линии, построенной по координатам точек срабатывания первого и второго пороговых устройств, с осью абсцисс [43].

Пример детектирования временной координаты начала эхо-импульса методом двух компараторов показан на рисунке 1.21.

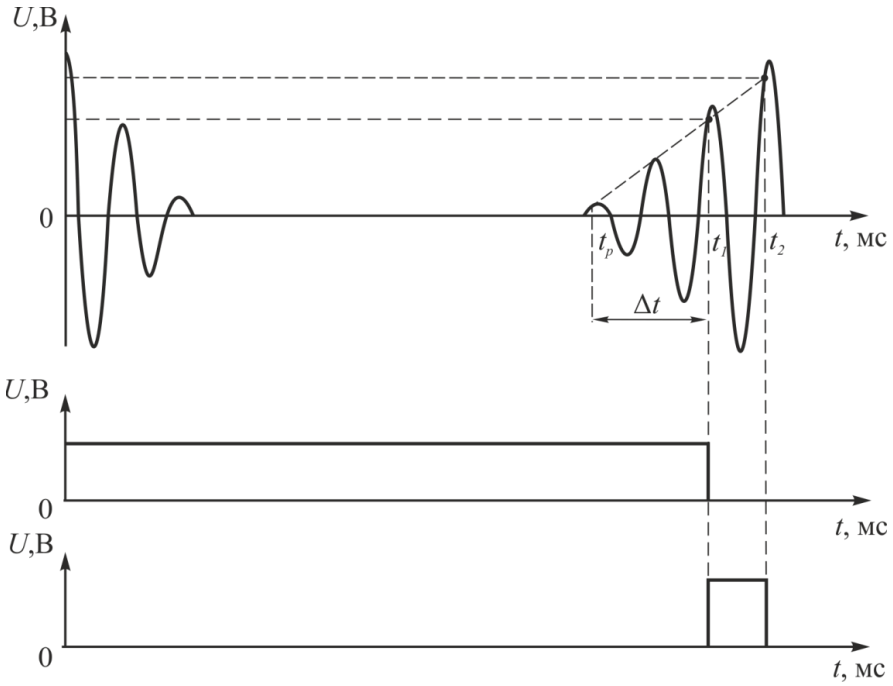


Рисунок 1.21 – Детектирование временной координаты начала эхо-импульса методом двух компараторов

Как видно из рисунка 1.21 в момент времени t_1 амплитуда эхо-сигнала достигает уровня U_1, которое является пороговым значением для первого порогового устройства. В момент времени t_2 амплитуда эхо-сигнала достигает уровня U_2, которое является пороговым значением для второго порогового устройства. Используя координаты этих точек $[t_1, U_1]$ и $[t_2, U_2]$строится прямая линия, точка пересечения которой с осью абсцисс является временной координатой t начала эхо–импульса:

$$t_p = t_1 - \frac{U_1}{U_2 - U_1} \cdot (t_2 - t_1). \qquad (1.4)$$

Максимальная ошибка получится если U_1 и U_2 будут чуть больше амплитудного значения напряжения предыдущих периодов (рисунок 1.21). В этом случае срабатывание порогового устройства произойдет в следующем периоде эхо-сигнала. И прямая линия, построенная по координатам пороговых устройств, пройдет не по пиковым значениям амплитуды, и, соответственно, ее пересечение

с осью абсцисс будет не в начале эхо-сигнала, что приведет к появлению погрешности.

$$U_{i+1}^{\max} = U_i^{\max} + k \cdot U_1, \tag{1.5}$$

где $i = 0, 1, \ldots, k$ – крутизна огибающей эхо-сигнала;

U_1 – пороговое напряжение первого компаратора.

Для метода двух компараторов можно сделать вывод, что чем больше угол наклона прямой, построенной по координатам, определенными пороговыми устройствами, тем меньше погрешность. Увеличение разницы в пороговых уровнях U_1 и U_2 также приводит к уменьшению погрешности [44].

1.4.2 Определение временной координаты начала эхо-сигнала определением координат экстремумов первых периодов

Построение огибающей эхо-сигнала по нескольким точкам позволяет определить точку ее пересечения с осью абсцисс, которая является начальной координатой эхо-сигнала. Это позволяет уменьшить погрешность измерений [45]. Огибающая нарастающей части эхо-сигнала обычно представляет собой монотонно возрастающую функцию. Следовательно, ее можно аппроксимировать полиномом второй степени [46, 47]:

$$s = a \cdot t^2 + b \cdot t + c \tag{1.7}$$

где s – амплитуда огибающей;

t – время;

a, b, c – коэффициенты полинома.

С учетом несимметричности формы эхо-сигнала относительно оси абсцисс со для аппроксимации нарастающей части эхо-сигнала целесообразно использовать две кривые. Для построения огибающих необходимы координаты трех экстремумов, соответствующих пикам эхо-сигнала, по которым вычисляются

коэффициенты полинома *a, b, c*. Одна огибающая строится по положительным экстремумам эхо-сигнала, другая – по отрицательным (рисунок 1.22). Две огибающие пересекаются в общей точек, которая является началом эхо-сигнала.

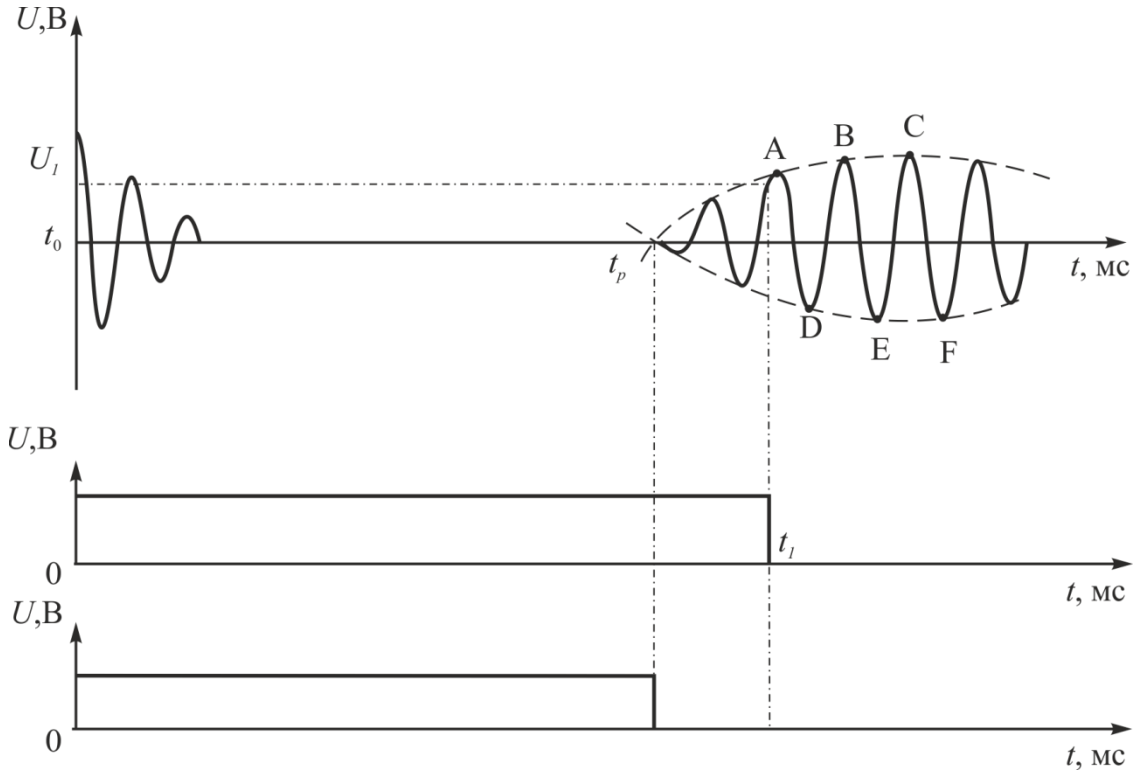


Рисунок 1.22 – Аппроксимация нарастающей части эхо-сигнала полиномами второй степени

Используя координаты трех экстремумов эхо-сигнала можно составить систему уравнений для расчета коэффициентов:

$$\begin{cases} s_1 = a \cdot t_1^2 + b \cdot t_1 + c \\ s_2 = a \cdot t_2^2 + b \cdot t_2 + c \\ s_3 = a \cdot t_3^2 + b \cdot t_3 + c \end{cases} \quad (1.8)$$

где s_1, s_2, s_3 – амплитуды эхо-сигнала в точках экстремумов;

t_1, t_2, t_3, - временные координаты трех экстремумов эхо-сигнала.

Решая систему уравнений (1.7) находим коэффициенты полинома *a*, *b*, *c*. Используя эту методику можно аппроксимировать нарастающую часть эхо-сигнала полиномом третьей степени, который в некоторых случаях позволяет получить более лучший результат. Однако для полинома третьей степени необходимо вычислить четыре полиномиальных коэффициента *a*, *b*, *c*, *d*. Соответственно нужно решать систему четырёх уравнений:

$$\begin{cases} s_1 = a \cdot t_1^3 + b \cdot t_1^2 + c \cdot t_1 + d \\ s_2 = a \cdot t_2^3 + b \cdot t_2^2 + c \cdot t_2 + d \\ s_3 = a \cdot t_3^3 + b \cdot t_3^2 + c \cdot t_3 + d \\ s_4 = a \cdot t_4^3 + b \cdot t_4^2 + c \cdot t_4 + d \end{cases} \quad (1.9)$$

Для решения систем уравнений (1.7) и (1.8) можно использовать метод Крамера [48]. Следует заметить, что погрешность определения временной координаты начала принятого сигнала методом построения огибающих нарастающей части эхо-сигнала полиномами второго и третьего порядков не зависит от амплитуды, но зависит от формы эхо-импульса, в отличие от метода одного компаратора.

Кроме того этот метод при любых линейных изменениях амплитуды эхо-сигнала дает нулевую погрешность, в отличие от метода одного компаратора. Использование метода огибающей эхо-сигнала полиномом второй или третьей степени позволяет уменьшить погрешность контроля в четыре раза по сравнению с методом одного компаратора [49].

1.4.3 Применение фазового метода для определения временного положения акустического импульса

Для прецизионных измерений скорости ультразвука в режиме бегущей волны большое распространение получил фазовый метод, сущность которого состоит в сравнении фаз двух сигналов: прошедшего через исследуемую среду и опорного [50]. Для реализации фазового метода используются как непрерывные,

так и импульсные колебания. Сравнение фаз производится в электрическом тракте [51].

Амплитуду синусоидального сигнала на входе порогового устройства можно определить, используя величину порогового напряжения и длительность импульса на его выходе (рисунок 1.23):

$$U_{\max} = \frac{U_{пор}}{\cos\frac{\Delta\varphi}{2}},$$

где $U_{пор}$ – пороговое напряжение;

Фазу $\Delta\varphi$ синусоидального сигнала, при которой сработало пороговое устройство, можно определить из выражения:

$$\Delta\varphi = \pi \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right).$$

Тогда:

$$U_{\max i} = \frac{U_{пор}}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta t_i}{T}\right)},$$

где t_i – длительность импульса на выходе порогового устройства;

T – период синусоидального сигнала;

$U_{\max i}$ – амплитудное значение синусоидального сигнала.

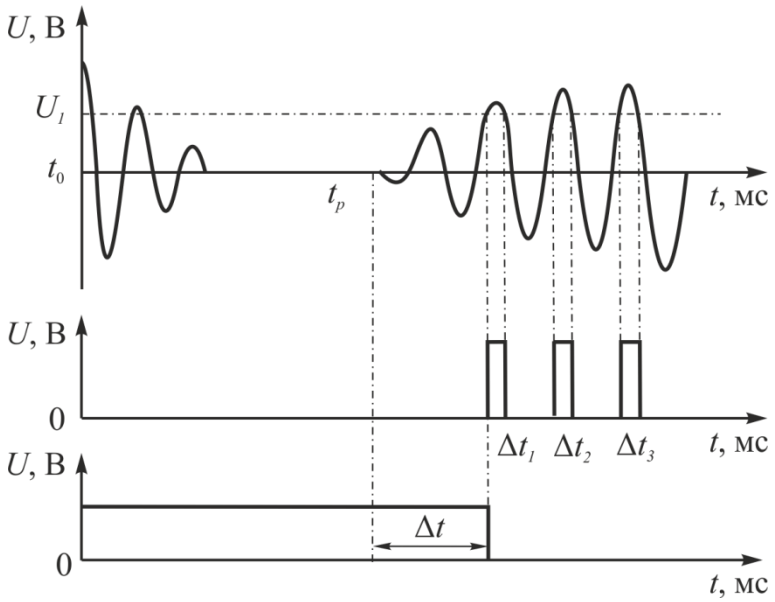


Рисунок 1.23 – Диаграмма эхо-сигнала (а), выходное напряжение компаратора (б) и погрешность в определении временной координаты эхо-сигнала (в)

Аппроксимирующий полином рассчитывается путем использования полученных пар данных U_{maxi} и t_{mi} в качестве исходных значений. Для полинома второй степени необходимы координаты трёх точек (пункт 1.4.2), по которым рассчитываются полиномиальные коэффициенты. Эти коэффициенты подставляются в уравнение огибающей:

$$U = a_1 \cdot t_0^2 + b_1 \cdot t_0 + c.$$

Пересечение этого полинома с осью абсцисс означает, что правая часть уравнения будет равна нулю. При этом получаем уравнение второй степени, корнями которого будет точка пересечения с осью абсцисс:

$$t_0 = \frac{b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4 \cdot a_1 \cdot c_1}}{2 \cdot a_1}.$$

Для фазового метода справедливо заключение, что с увеличением длительности импульса на выходе порогового возрастает погрешность в определении амплитудного значения синусоидального сигнала и значит, возрастает погрешность в определении временной координаты эхо-сигнала. Кроме того, погрешность в определении амплитудного значения синусоидального сигнала увеличивается с увеличением погрешности расчета фазы синусоидального сигнала, при которой произошло срабатывание порогового устройства. Поэтому этот метод применим только для эхо-импульсов с малой скоростью нарастания огибающей и для расчета следует выбирать только первые три импульса на выходе порогового устройства [52].

1.4.4 Корреляционная обработка принятого сигнала

Корреляционная обработка сигнала состоит в определении степени сходства двух сигналов, для чего используются корреляционные функции. Корреляционная функция детерминированного сигнала *s(t)* с конечной энергией представляет собой интеграл (в бесконечных пределах) от произведения двух участков сигнала, сдвинутых друг относительно друга на время τ:

$$B(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot s(t-\tau) dt. \qquad (1.10)$$

Корреляционная функция показывает величину идентичности между исходной функцией и ее копией, сдвинутой на величину τ. Чем больше сходство между функцией и ее копией, тем больше значение корреляционной функции. Выражение (1.10) называют автокорреляционной функцией, которая интегрирует произведение смещенных друг относительно друга участков одной и той же функции [53]. При вычислении степени идентичности участков двух разных функций, например, $s(t_1)$ и $s(t_2)$, то используют формулу (1.11):

$$B_{1,2}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) \cdot s_2(t-\tau) dt. \quad (1.11)$$

$B_{1,2}$ – взаимная корреляционная функция сигналов $s(t_1)$ и $s(t_2)$.

Широкое применение функция корреляции находит в цифровой обработке сигналов. В частности, при вычислении момента начала записи информации камерами слежения. Как только посторонний объект появился в зоне контроля, автокорреляционная функция изменила свое значение, что служит сигналом начала включения записи. Другой широко распространенный пример, цифровая обработка сигналов с использованием преобразования Фурье: частотная фильтрация входного сигнала, которая успешно заменяет аналоговую фильтрацию с использование различных фильтров, настроенных на разные частоты [54].

Корреляционная обработка позволяет достигать большей точности в определении параметров вибраций за счет подавления шума в приемном тракте. Однако, в данном случае диапазон частот ограничивается длительностью УЗ импульса. С уменьшением частоты вибраций и, как следствие, относительной длительности зондирующих импульсов точность измерений снижается [55].

1.4.5 Двухчастотный способ зондирования объекта контроля

Для точного определения момента прихода эхо-сигнала известен способ двухчастотного зондирования [56]. Вычисление момента возврата эхо-импульса на приемник системы контроля способом двухчастотного зондирования состоит в следующем. Объект контроля зондируется двумя сигналами с разной частотой, а затем фиксируются временные координаты для каждого сигнала по моменту срабатывания компаратора (точки t_1 и t_2 рисунка 1.24).

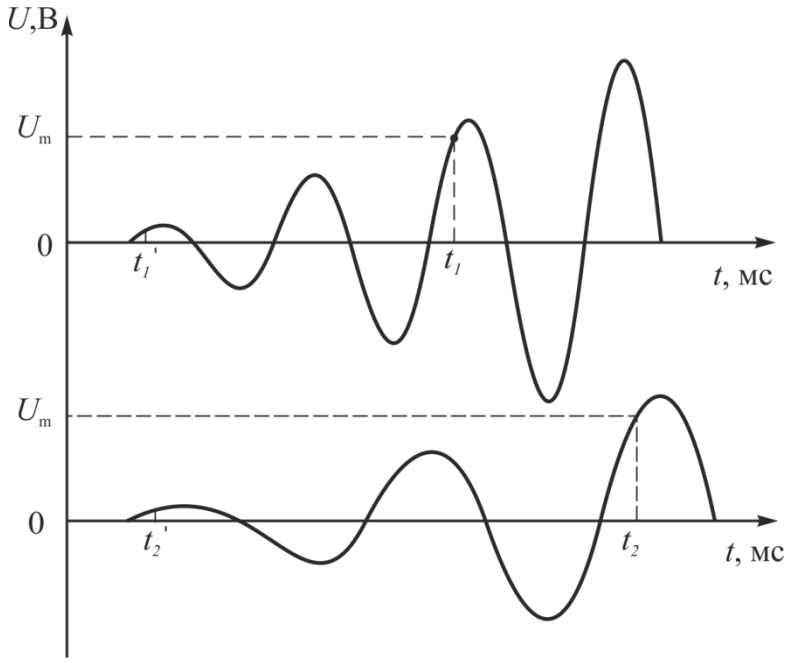


Рисунок 1.24 – Принцип определения момента прихода акустического импульса способом двухчастотного зондирования.

По формуле (1.12) определяется разность между моментами срабатывания компаратора при ряде значений *i*.

$$(\Delta t_1 - (i-1)\cdot T_1) - (\Delta t_2 - (i-1)\cdot T_2) = \min \qquad (1.12)$$

где T_1 – период колебаний первой ультразвуковой волны;

T_2 – период колебаний второй ультразвуковой волны;

i – номер коррекции;

Δt_1 – первый измеренный временной интервал;

Δt_2 – второй измеренный временной интервал, полученное значение временного интервала $\Delta t_1 - (i-1)\cdot T_1$ используют при определении расстояния до отражающей поверхности [57].

Минимальное значение разности будет получено при таком значении *i*, которое будет соответствовать номеру периода сигнала, в котором сработал компаратор [58]. Далее для дальнейших вычислений выбирается более высокочастотный сигнал (для уменьшения максимальной ошибки способа), в

данном случае это сигнал с периодом T_1 (верхний сигнал рисунка 1.24). В выражение $\Delta t_1 - (i-1) \cdot T_1$ подставляется вычисленное значение i, временная координата сигнала перемещается в начало приема эхо-сигнала (перемещение временной координаты из точки t_1 в точку t_1', рисунок 1.24) [60].

Двухчастотный способ позволяет определить момент прихода эхо-сигнала с максимальной ошибкой, которая будет равняться четверти периода эхо-сигнала [59].

Выводы

1) Проведенный аналитический обзор существующих систем контроля паллет подтвердил актуальность проведенной работы для выпускающих производств.

2) Анализ методов контроля геометрических параметров паллет показал, что наиболее перспективным из них является ультразвуковой метод, обладающий наибольшей чувствительностью к характерным технологическим и эксплуатационным дефектам в деревянных поддонах.

3) Двухчастотный способ позволяет определить временную координату момента прихода принятого сигнала с высокой точностью, однако его применение для частот ультразвукового диапазона не было исследовано ранее. Повышение точности посредством детектирования фазы сигнала является основным направлением работ в рамках выбранной тематики и подробно описано во второй главе.

Глава 2 Теоретическое исследование двухчастотного способа зондирования с фазовой коррекцией

Применение двухчастотного способа зондирования объекта контроля ограничивается точностью, которая будет находиться в пределах от 0 до четверти периода при условии, что для текущего контроля выбрано оптимальное соотношение частот и правильно задан алгоритм определения порогового напряжения компаратора. В противном случае повышается вероятность срабатывания компаратора в разных по номеру периодах для сигналов разных частот, что приведет к существенному повышению погрешности контроля.

В работах [61-63] описаны случаи для волноводного распространения сигнала в волноводе круглого сечения, при этом показано оптимальное соотношение частот, которое находиться в диапазоне (1; 1,3]. Для безграничного пространства и отсутствия отражения сигнала от других объектов, кроме объекта контроля, таких исследований не проводилось, поэтому требуется дополнительное исследование, которое позволит определить соотношение частот и уровень порогового напряжения для проведения контроля с требуемой точностью. Также требует дополнительного исследования соотношения частот, с учетом применения серийно изготавливаемых датчиков фиксированных частот: 25 кГц, 40 кГц, 80 кГц и т.д.

Обработка принятого сигнала также требует дополнительного исследования, так как очевидно, что применение автоматической регулировки усиления, фиксированного усиления или временной регулировки усиления окажет влияние на количественную характеристику контроля [64-69].

2.1 Способ двухчастотного зондирования с фазовой коррекцией

Двухчастотное зондирование позволяет исключить значительную часть ошибок измерения, связанных с изменением формы акустического сигнала при

распространении от источника до отражателя и от отражателя до приемника, а также повысить точность определения расстояния до текущей точки объекта контроля [70, 71].

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 (рисунок 2.1). Из-за разного периода зондирующих сигналов срабатывание порогового устройства будет происходить в разные моменты времени, но в одинаковых номерах периодов для двух эхо-сигналов (рисунок 2.1 точки t_1 и t_2). Используя эти две временные координаты срабатывания порогового устройства производится расчет временной координаты начала эхо-сигнала [72, 73].

Для определения временной координаты начала эхо-сигнала необходимо произвести операцию сравнения двух временных интервалов после их последовательного уменьшения на период зондирующего сигнала в соответствии с выражением:

$$\left(t_1 - n \cdot T_1\right) - \left(t_2 - n \cdot T_2\right) = t_{\min} > 0, \qquad (2.1)$$

где $t_{\min}$ – минимальное положительное значение;

T_1 – период колебаний ультразвуковой волны частоты f_1;

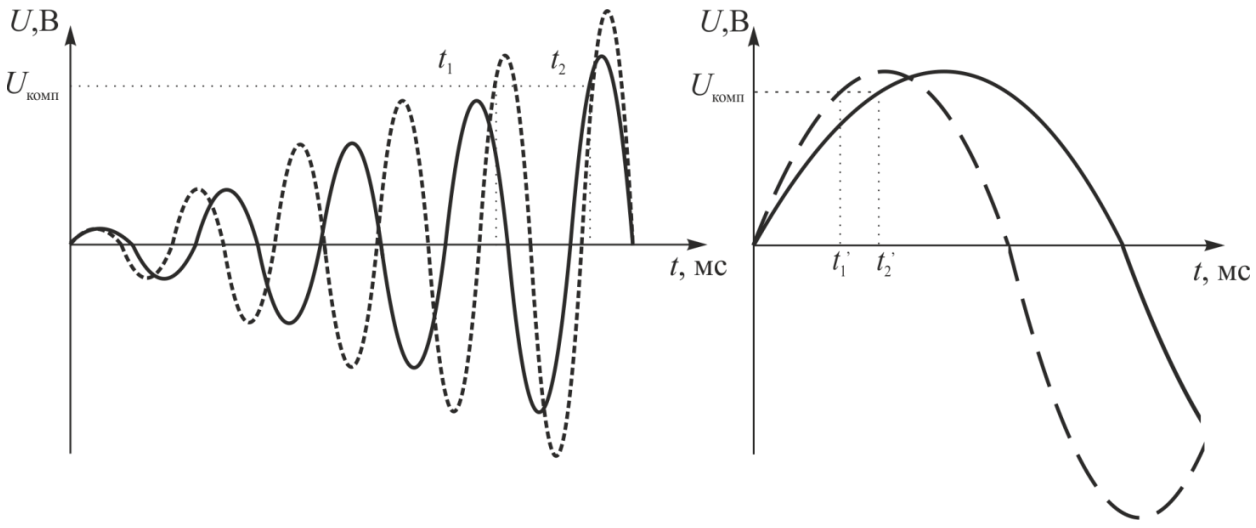
T_2 – период колебаний ультразвуковой волны частоты f_2;

n – натуральный ряд чисел начиная с 1;

t_1 – время распространения эхо-сигнала частотой f_1, определенное пороговым устройством;

t_2 – время распространения эхо-сигнала частотой f_2, определенное пороговым устройством.

Величина $\left(t_1 - n \cdot T_1\right)$ является точным временем распространения упругой волны и используется для расчета расстояния до отражателя [74].



а *б*

Рисунок 2.1 – Диаграммы нарастающей части двух эхо-сигналов (сплошная линия –эхо-импульс частотой f_1, пунктирная линия –эхо-импульс частотой f_2), *а* – временная координата срабатывания порогового устройства, *б* – результат выполнения выражения 2.1, где $U_{комп}$ – пороговое напряжение; t_1, t_2 – временные координаты срабатывания порогового устройства для двух эхо-сигналов соответственно; t'_1, t'_2 – результат итерационных вычислений по выражению 2.1

Двухчастотное зондирование включает следующую последовательность действий:

1) Выбор частот зондирования. При применении двухчастотного зондирования необходимо определить частоты сигналов, которые будут использованы для контроля. Выбор основывают на компромиссе между дальностью контроля и точностью измерения. Чем меньше частота, тем больший диапазон расстояний можно контролировать, но в тоже время неизбежно страдает точность. Вначале задается высшая частота, от которой будет зависеть максимальная дальность зондирования. Вторая частота выбирается исходя из свойств излучателя. Выбору оптимального соотношения частот для получения минимально возможной погрешности посвящен параграф 2.2.1. текущей главы рукописи.

С учетом расстояния до объекта контроля от 30 до 60 сантиметров целесообразно использовать частоты в диапазоне 25-40 кГц. Промышленностью выпускаются излучатели фиксированных частот, разность между которыми существенно превышает соотношение 1,3, вследствие чего необходимо провести исследование влияния соотношения частот на точность измерения [75].

2) Последовательное зондирование на выбранных частотах, определение времен t_1 и t_2.

После того, как задались частотами, производят поочередное излучение сигналов, фиксируются моменты времени t_1 и t_2, которые были показаны на рисунке 2.1.а., эти точки соответствуют временной координате момента достижения каждым из сигналов заданного порогового уровня.

3) Построение итерационной матрицы:

$$\begin{pmatrix} t_2 - t_1 \\ (t_2 - T_2) - (t_1 - T_1) \\ (t_2 - 2 \cdot T_2) - (t_1 - 2 \cdot T_1) \\ \vdots \\ (t_2 - n \cdot T_2) - (t_1 - n \cdot T_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_0 \\ k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

На основе значений t_1 и t_2 строится итерационная матрица, минимальный положительный член которой позволит определить номер периода эхо-сигнала, в котором произошло срабатывание порогового устройства. Определение номера периода основано на уменьшении временной разности между двумя временными координатами одноименных периодов при приближении к первому. Последующая итерация приводит к отрицательному значению итерационного члена матрицы. Этот признак используется при формировании информативного параметра [76, 77].

На рисунке 2.2 показан случай, когда срабатывание компаратора произошло в пятом периоде. Разница между временными координатами сокращается после каждой итерации:

$$k_1 > k_2 > k_3 > k_4 > 0;$$

$$k_5 < 0.$$

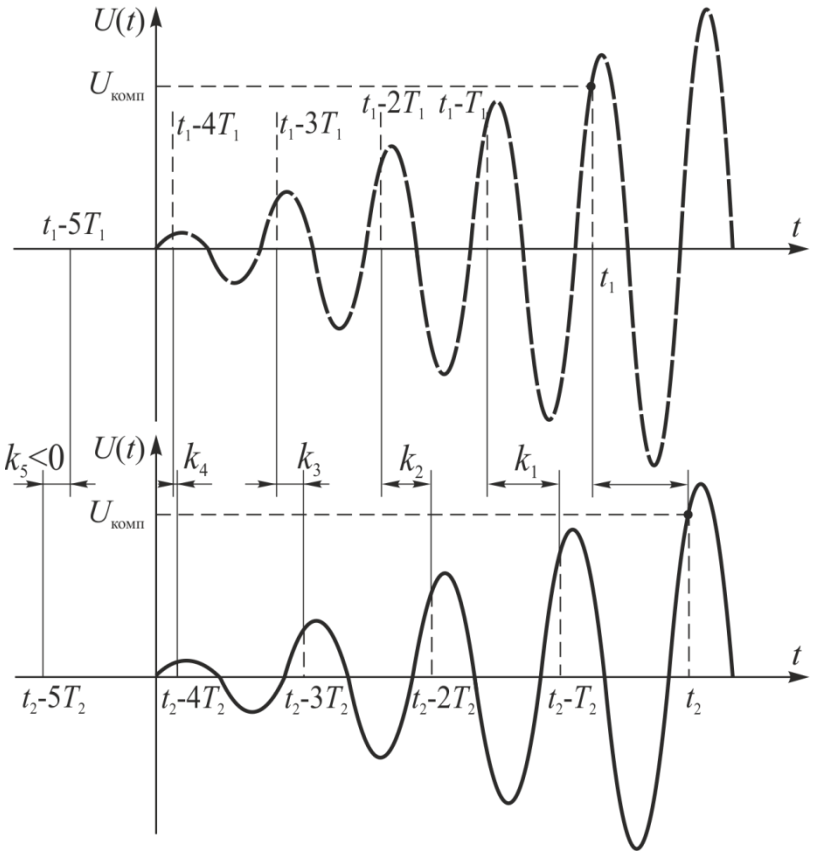


Рисунок 2.2 – Диаграммы, иллюстрирующие принцип нахождение первого периода эхо-сигналов (сплошная линия –эхо-импульс частотой f_1, пунктирная линия –эхо-импульс частотой f_2)

Номер периода эхо-сигнала, в котором сработало пороговое устройство, т.е. амплитуда эхо-сигнала превысила пороговое значение, определяет размер итерационной матрицы.

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

Значение n представляет собой номер минимального положительного коэффициента итерационной матрицы, который и является номером периода эхо-сигнала, в котором сработало пороговое устройство.

Зная номер периода, в котором сигнал достиг порогового уровня, простым вычитанием определяется момент времени начала эхо-сигнала.

В расчете используем сигнал большей частоты, что позволит определить временную координату с большей точностью.

$$t_0 = t_1 - n \cdot T_1,$$

где $f_1 = \frac{1}{T_1}$ – большая из двух излучаемых частот.

Минимально возможная погрешность определения временной координаты будет определяться фазой сигнала, в которой произошло срабатывание компаратора, и будет находиться в диапазоне от нуля до четверти периода [78].

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

Для определения временной координаты начала эхо-импульса можно использовать зависимость длительности импульса, формируемого на выходе порогового устройства при сравнении эхо-сигнала с пороговым.

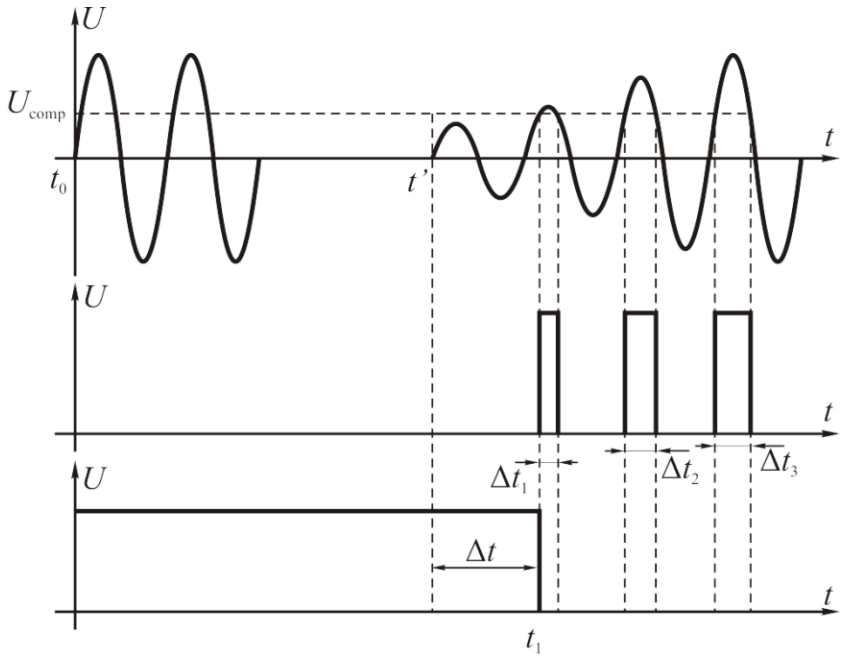


Рисунок 2.3 – Иллюстрация изменения длительности импульса, формируемого на выходе порогового устройства при сравнении эхо-сигнала с пороговым, а- эхо-сигнал, б - импульсы на выходе компаратора

Фазу эхо-сигнала, в которой амплитуда эхо-сигнала превысила пороговый уровень и произошло срабатывание порогового устройства, можно определить из сигналов на его выходе (рис. 2.3):

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

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

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

$$t_0 = (t_1 - n \cdot T_1) - \left(\frac{T_1}{4} - \frac{\Delta t_1}{2} \right), \qquad (2.3)$$

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

В данном разделе диссертационной работы приводятся результаты исследования двухчастотного метода зондирования с фазовой коррекцией, целью которого является контроль геометрических размеров исследуемого объекта.

Реализация в алгоритме обработки данных методики анализа временной координаты срабатывания порогового устройства в разных периодах двух эхо-сигналов на разных частотах позволит использовать для детектирования сигналы с соотношением частот больше двух.

2.2 Теоретическое исследование способа двухчастотного зондирования с фазовой коррекцией

Для исследования возможностей предложенного способа была разработана в программном пакете Delphi математическая модель акустического тракта ультразвукового локатора.

При реализации математической модели был применен метод геометрической акустики, который широко используют если размеры отражателя больше длины волны. Несмотря на свою простоту метод позволяет получить хорошие результаты.

При прохождении поддона по конвейеру используется односторонний доступ к объекту контроля, т.е. приемник и излучатель совмещены и находятся над конвейерной лентой. При построении математической модели сигнала воспользуемся методом мнимого приемника. В этом случае излучатель и приемник располагаются по разные стороны акустического тракта. В модели представим распространение упругой волны в виде лучей, расходящихся от

излучателя. На приемник каждый луч поступает с некоторой задержкой по времени, которая определяется пройденным расстоянием. Источник излучения будем считать точечным, а приемник излучения – с его истинными значениями. На рисунке 2.4 показан акустический тракт с источником и приемником упругих колебаний. Точечный излучатель имеет широкую диаграмму направленности.

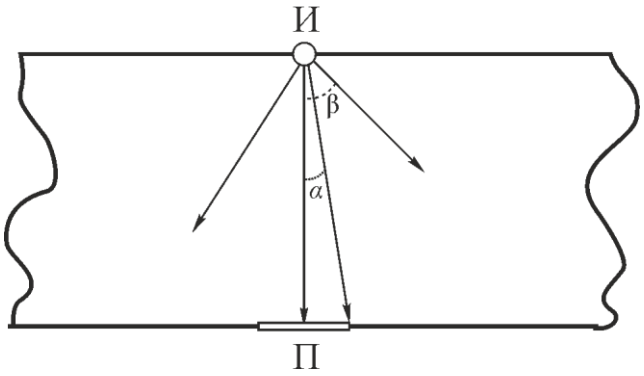


Рисунок. 2.4 – Расположение источника и приемника сигнала, И – источник излучения, П – приемник излучения, *L* – расстояние до поддона

Излучаемый сигнал по методу геометрической акустики может быть представлен бесконечным количеством расходящихся лучей. Однако на приемник попадут только те лучи, траектория которых проходит через приемник, т.е. на приемник придут только лучи, отклонение от нормали которых в соответствие с основами геометрии будет укладываться в размер приемника.

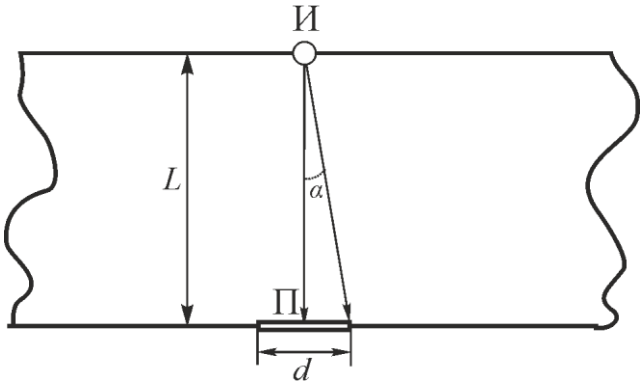


Рисунок 2.5 – Расстояние, пройденное каждым лучом, пришедшей на приемник

В зависимости от угла наклона к нормали, расстояние, пройденное лучом будет лежать в диапазоне от L до S, где S:

$$S = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}, \tag{2.4}$$

Чем сильнее луч отклоняется от нормали, тем большее расстояние проходит акустический сигнал, следовательно, тем больше будет его задержка. Необходимо также учесть, что пройденное расстояние будет влиять на амплитуду сигнала [79]. Зная путь, пройденный каждым лучом, можно рассчитать время прихода каждого луча на приемник.

$$t_\alpha = S_\alpha \cdot v,$$

где v – скорость распространения ультразвука в среде;

S_α – расстояние, пройденное сигналом от излучателя до приемника под углом α.

Временная разность прихода на приемник различных лучей по отношению к лучу, распространяющемуся по нормали находится по формуле:

$$\Delta t_\alpha = \left(L - S_\alpha\right)/v, \tag{2.5}$$

Результирующий сигнал приемника будет включать сумму всех пришедших на него лучей:

$$U(t) = U_0 \sin\left(2\pi f\left(t - \frac{L}{v}\right)\right) \cdot 1\left(\frac{L}{v}\right) + \sum_{\alpha=1}^{arctg\left(\frac{d}{2L}\right)} U_\alpha \cdot \sin\left(2\pi f\left(t - t_\alpha\right)\right) \cdot 1\left(t_\alpha\right), \tag{2.6}$$

где $1\left(\frac{L}{v}\right)$ и $1(t_\alpha)$ – функции Хевисайда, описывающие эхо-сигнал с учетом задержек распространения каждого луча.

Любая точка среды, до которой дошел фронт упругой волны, начинает колебаться с нарастающей амплитудой, подобно маятнику, постепенно достигая максимальной амплитуды. Необходимо учесть этот эффект в результирующей формуле, описывающей сигнал:

$$U_p(t) = \left(e^{-t/\tau} \cdot 1\left(\frac{L}{v}\right) - e^{-t/\tau} 1(t_{nn}) \right) \cdot U(t), \qquad (2.7)$$

где $U(t)$ – сумма всех лучей, пришедших на приемник (формула 2.6);

$e^{-t/\tau}$ – параметр, определяющий скорость нарастания фронта сигнала;

$1(t_{nn})$ – функция Хевисайда, ограничивающая длительность нарастающей част эхо-сигнала;

$t_{\text{пп}}$ определяется длительностью возбуждающего воздействия на излучающий элемент.

Следующий фактор, который нужно предусмотреть – уменьшение амплитуды сигнала после окончания возбуждающего воздействия. Уменьшение не происходит мгновенно, т.к. энергия запасенная в датчике расходуется постепенно. Поэтому в математическую модель добавлен процесс плавного уменьшения амплитуды эхо-сигнала, начало которого совпадает с моментом прекращения возбуждающего воздействия:

$$U(t) = 1(t_{nn}) \cdot \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \cdot U_p(t), \qquad (2.8)$$

где $U_{\text{р}}(t)$ – функция описывающая сигнал на приемнике;

τ – постоянная времени переходного процесса, зависит от свойств среды и датчика.

В модели предусмотрено влияние параметров окружающей среды (температура, состав, влажность и т.д.) на скорость распространения упругих колебаний в воздухе. Температурная зависимость скорости распространения упругой волны в воздушной описывается по формуле:

$$c_B = 331.4 + 0.6 \cdot T_B, \tag{2.9}$$

где $c_в$ – скорость ультразвука в воздухе, м/с;

331,4 (м/с) – скорость ультразвука при 0°С.

При распространении сферические волны ослабевают обратно пропорционально квадрату расстояния, что связано с расхождением волны в пространстве [80]. Ослабевание акустической волны учтено в математической модели.

2.2.1 Описание математической модели

Математическая модель разработана с использованием пакета программ Delphi 7. На рисунке 2.6 представлена основная панель управления вычислениями. Панель управления позволяет задать частоты, расстояние и температуру окружающей среды, амплитуду сигнала на приемнике, количество периодов сигнала возбуждения, а также опорное напряжение компаратора [81].

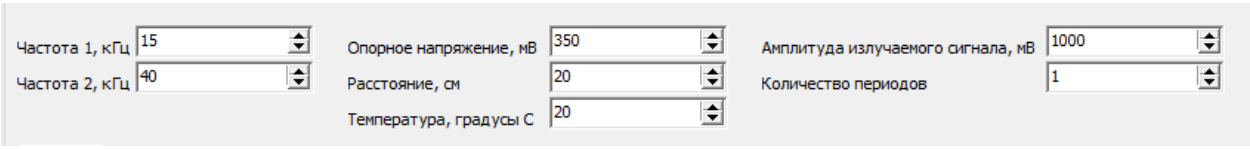


Рисунок. 2.6 – Основная панель управления

Интерфейс оператора состоит из двух вкладок: «Графики» и «Погрешности». Вкладка «Графики» представлена на рисунке 2.7.

Графы «Частота 1, кГц» и «Частота 2, кГц» предназначены для задания первой и второй частоты зондирования соответственно. Значения частот задается

в кГц, предполагается, что $f_1 < f_2$. Диапазон частот, в котором математическая модель прошла верификацию составляет 10 – 300 кГц. Применимость модели показана только для ультразвукового диапазона частот и при отсутствии дополнительных отражений акустических волн от жестких стенок.

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.

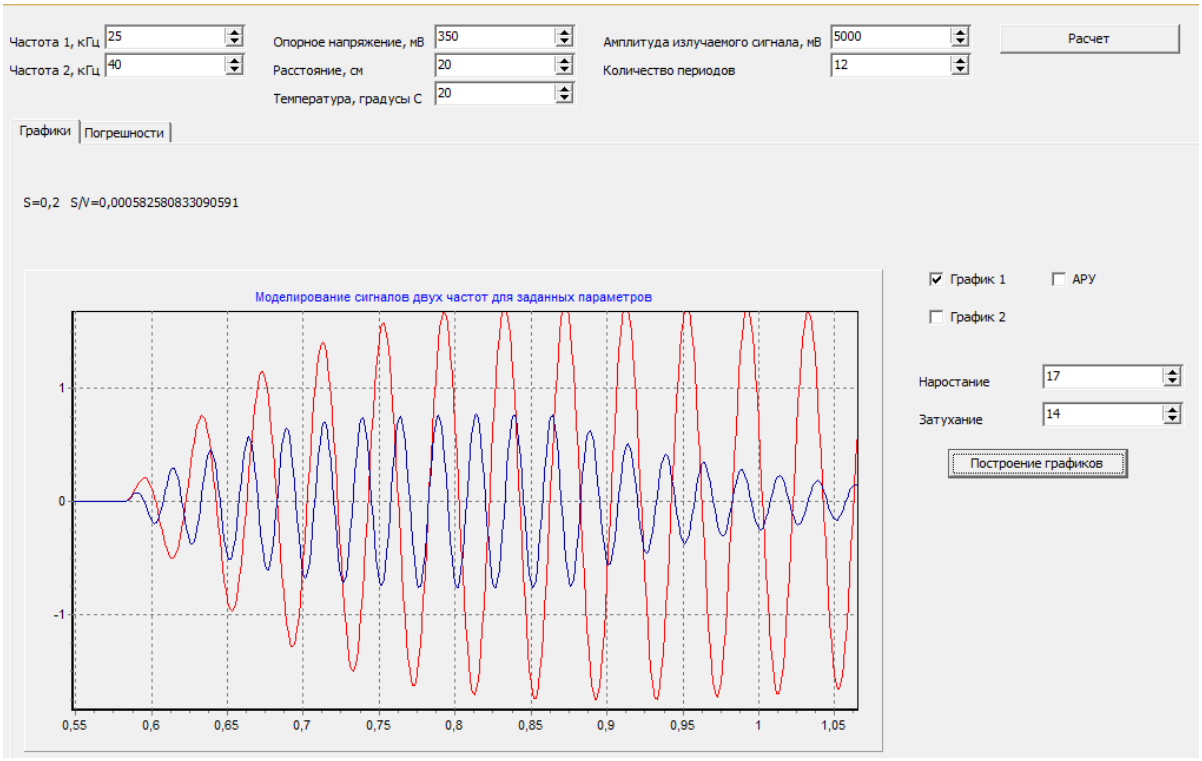


Рисунок 2.7 – Вкладка «Графики» интерфейса оператора

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

Дополнительные окна позволяют откорректировать коэффициенты нарастания и затухания сигнала. Они применялись для верификации математической модели.

Расчет измеряемого расстояния производиться в соответствии с выбранной обработкой сигналов. Предусмотрено два вида обработки сигнала: фиксированный коэффициент усиления для выбранной частоты и расстояния и автоматическая регулировка усиления (АРУ), где коэффициент усиления подбирается относительно двух каналов исходя из требования получения равных максимальных значений сигнала. Применение автоматической регулировки усиления, фиксированного коэффициента по каждому каналу или одинаковые коэффициенты усиления для каждой частоты оказывают различное влияние на точность контроля, что поможет в выборе оптимальной реализации [82, 83].

На рисунке 2.8 показан результат моделирования сигналов с использованием АРУ.

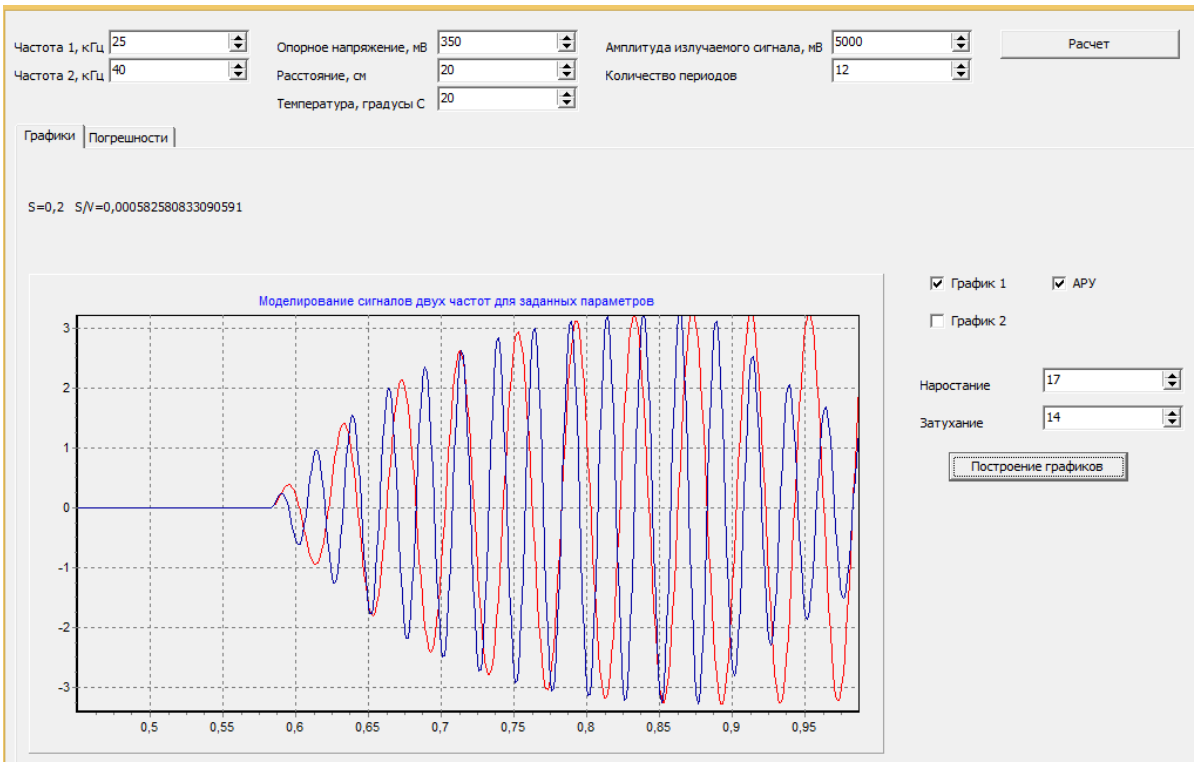


Рисунок 2.8 – Моделирование принятых сигналов с использованием АРУ

Элементы управления на вкладке «Графики» позволяют выставить параметры для расчета сигнала: коэффициенты нарастания и затухания, способ усиления сигнала. После задания всех параметров и нажатия кнопки «Построение графиков» в первом диалоговом окне будут построены расчетные графики для сигналов двух выбранных частот.

Вкладка «Погрешности», изображенная на рисунке 2.9 используется для расчета погрешностей контроля для выбранных случаев: в зависимости от частот излучения, дальности объекта контроля относительно излучателя и порогового напряжения. Выбранный для исследования параметр задается начальным и конечным значениями, остальные данные считываются из основной панели управления.

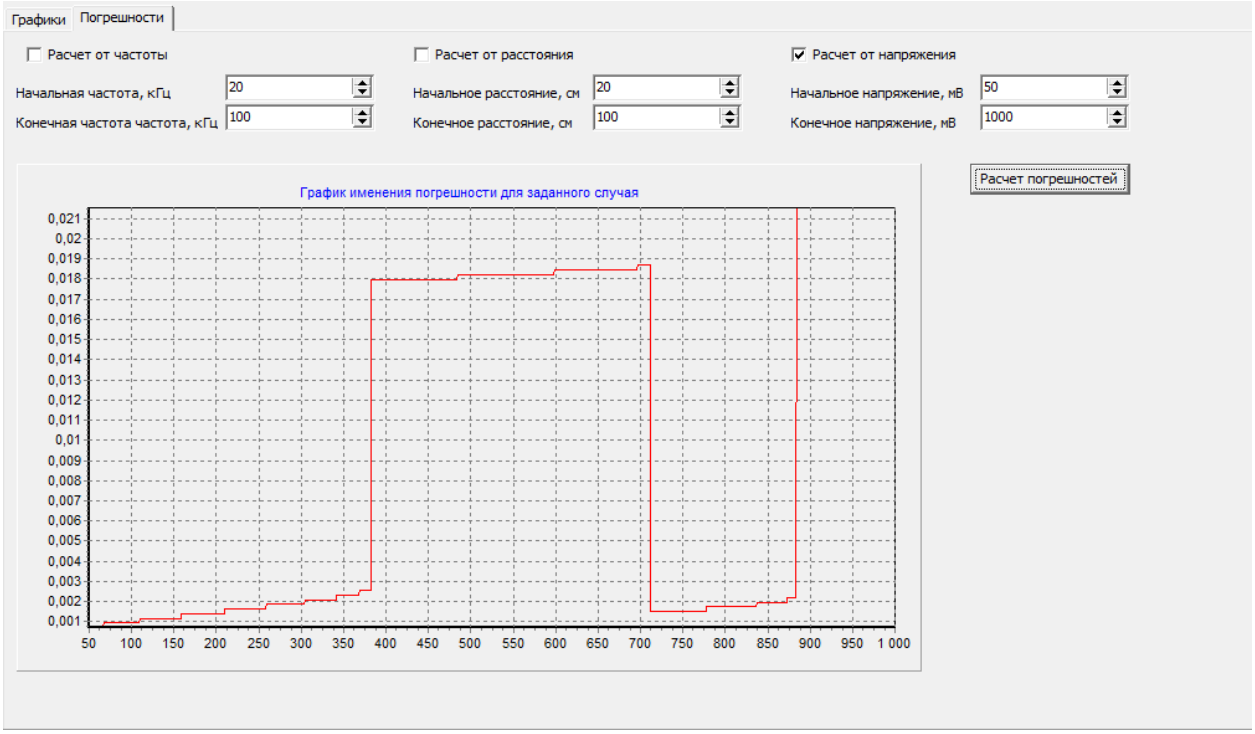


Рисунок 2.9 – Вкладка «Погрешности»

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 рисунках 2.10, 2.11 и 2.12 показаны графики сравнения реальных сигналов и математического моделирования.

Для верификации математической модели были использованы данные с датчиков, работающих на 25, 40, 80 и 100 кГц. В эксперименте расстояние до объекта контроля изменялось от 20 см до 1,5 метров. Количество периодов зондирующего сигнала изменялось в диапазоне от 2 до 20 [84].

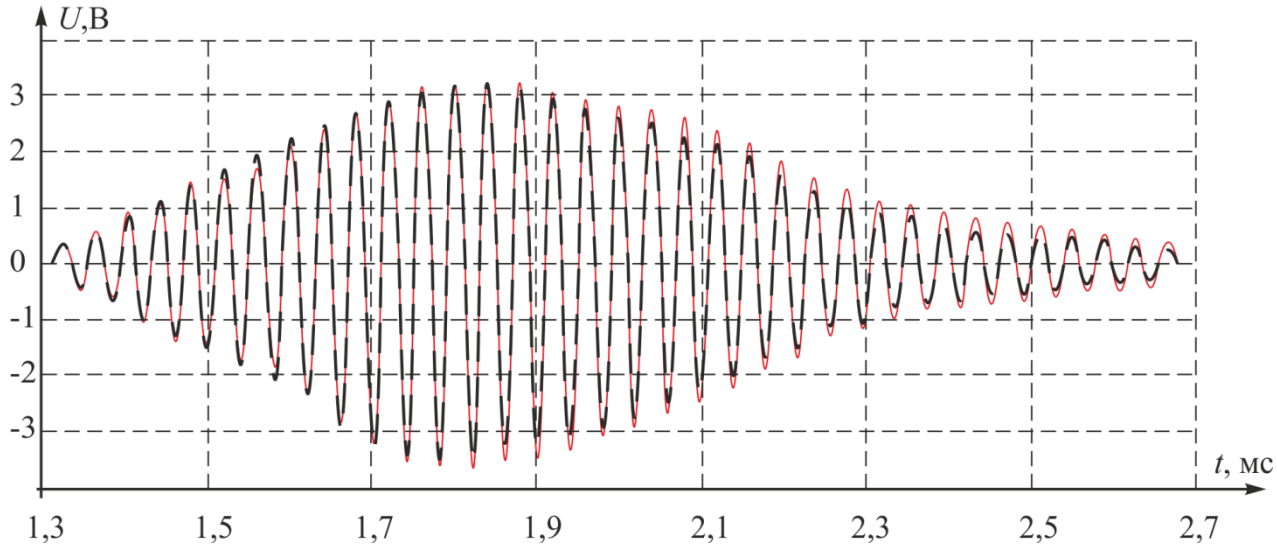


Рисунок 2.10 – Сравнение математической модели и реального сигнала, частота 25 кГц, расстояние до объекта контроля 40 см, 15 периодов зондирующего сигнала. Красная сплошная линия – эксперимент, черная пунктирная – теоретический график

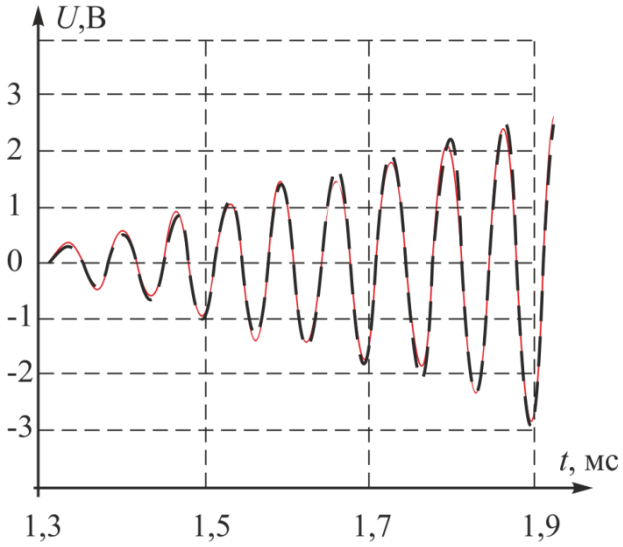


Рисунок 2.11 – Сравнение нарастания сигнала математической модели и экспериментального, частота 25 кГц, расстбояние до объекта контроля 40 см. Красная сплошная линия – эксперимент, черная пунктирная – теоретический график

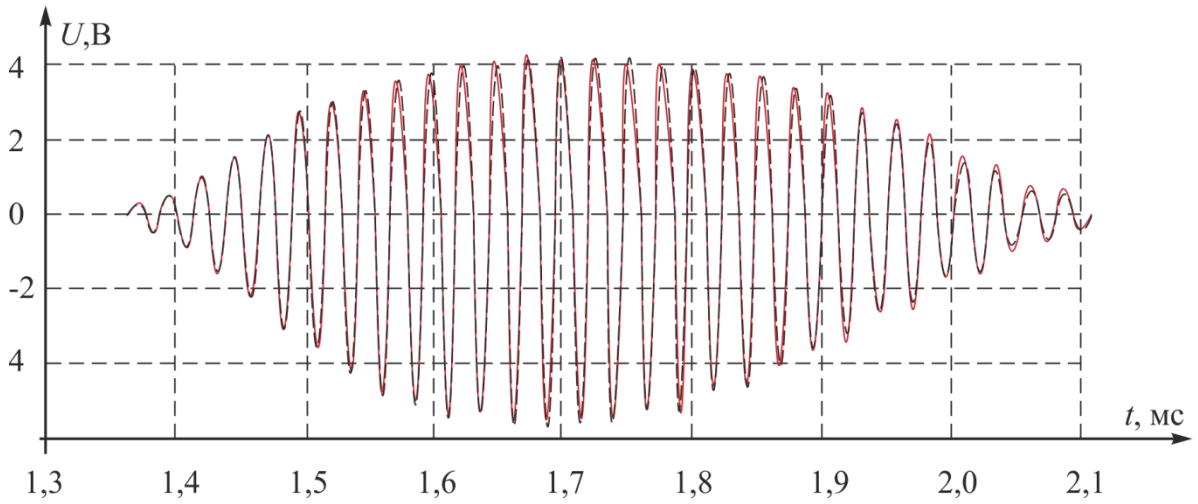


Рисунок 2.12 – Сравнение математической модели и реального сигнала, частота 40 кГц, расстояние до объекта контроля 50 см, 12 периодов зондирующего сигнала. Красная сплошная линия – эксперимент, черная пунктирная – теоретический график

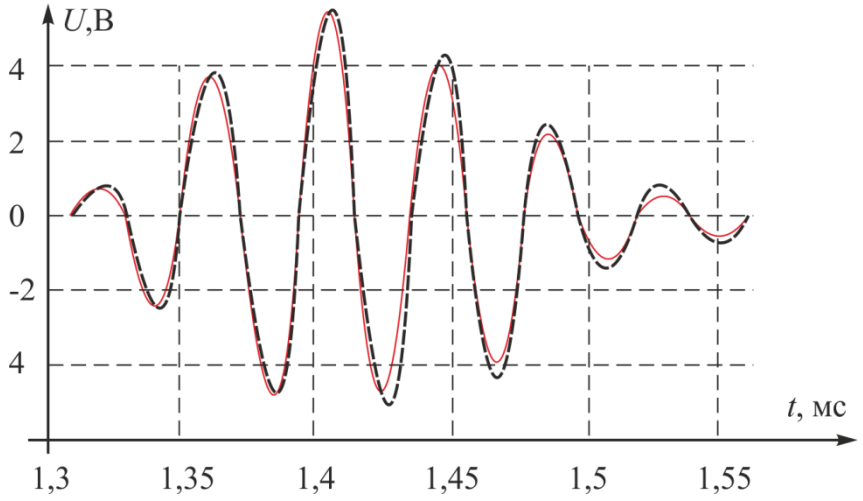


Рисунок 2.13 – Сравнение математической модели и реального сигнала, частота 25 кГц, расстояние до объекта контроля 50 см, два периода зондирующего импульса. Красная сплошная линия – эксперимент, черная пунктирная – теоретический график

Среднеквадратичное отклонение математической модели от реального сигнала составило не более 20 мВ для сигнала с амплитудой от 3 до 5 В. Незначительные расхождения в амплитудах не окажут существенного влияния на отработку алгоритма обработки сигнала [85].

2.2.2 Исследование влияния соотношения частот на точность определения расстояния

Разная скорость нарастания переднего фронта сигнала приведет к появлению интервалов напряжения, в которых срабатывание компаратора произойдет в разных по номеру периодах, что существенно повлияет на ошибку контроля.

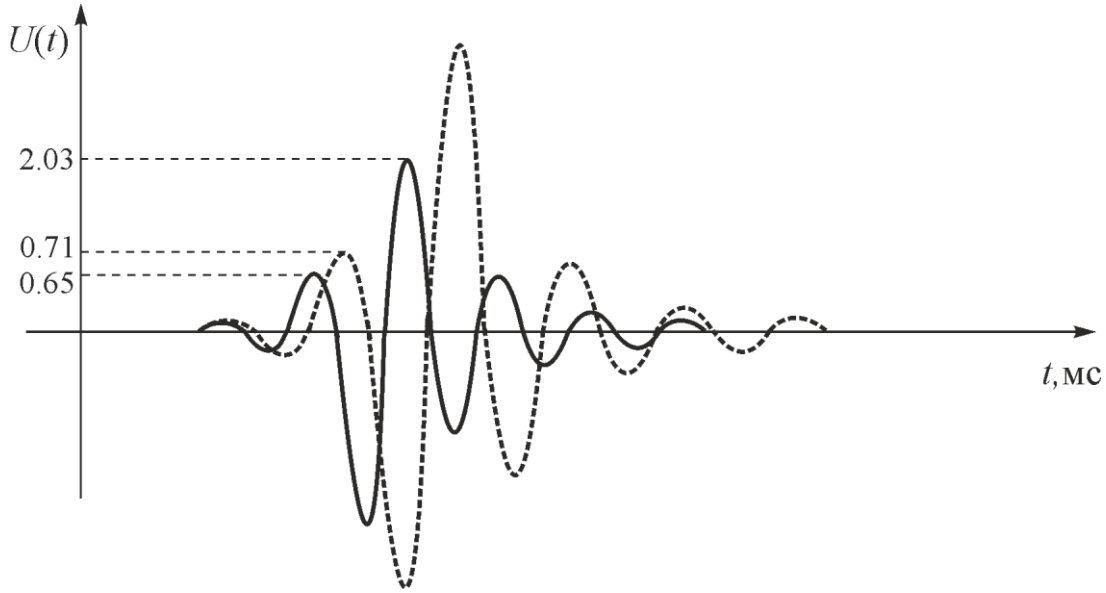


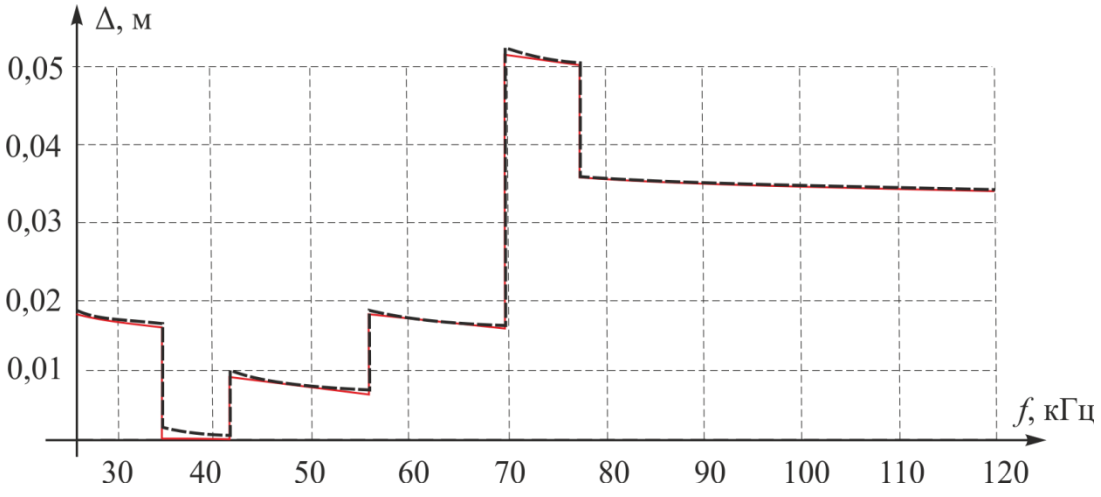
Рисунок. 2.14 – Демонстрация причины повышенной ошибки. f_1=25 кГц, f_2=40 кГц

Выбор излучаемых частот является важным моментом, способным повлиять на точность определения геометрических размеров объекта 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.

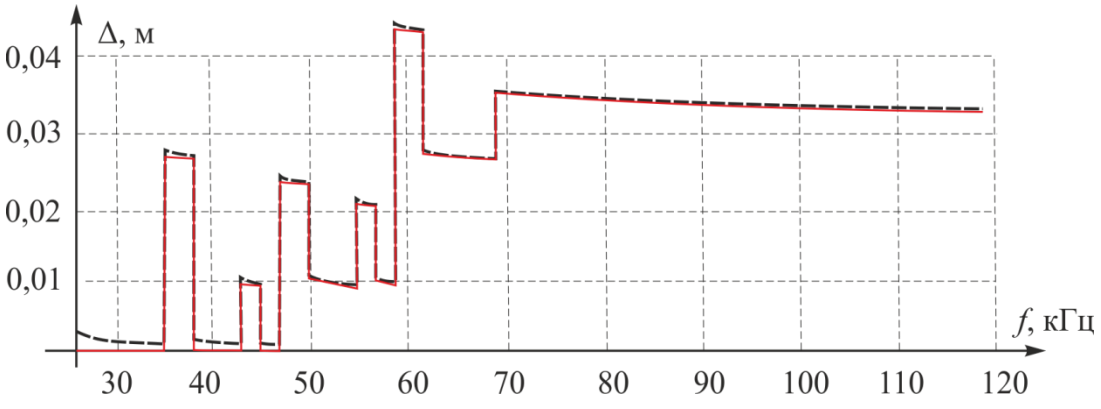
Исследования соотношения частот проведены на верифицированной математической модели с использованием реальных сигналов. Изменяемые

параметры: пороговое напряжение компаратора, измеряемое расстояние, количество периодов излучения.

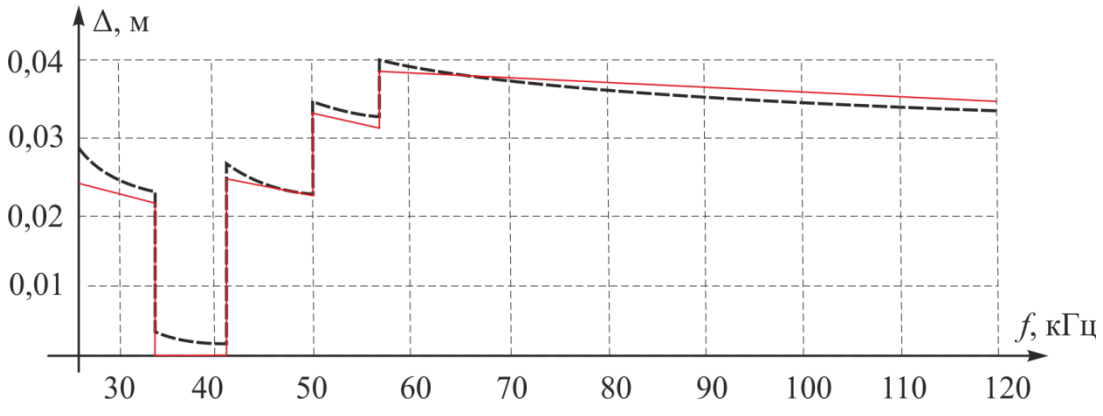
При одинаковом коэффициенте усиления для разных частот и при разных пороговых напряжениях ($U_{пор}/U_{max}$=0,1; $U_{пор}/U_{max}$=0,3; $U_{пор}/U_{max}$=0,5) получены зависимости погрешности контроля расстояния при изменении частоты сигнала, изображенные на рисунке 2.15. На этапе сбора и анализа данных были получены зависимости для разных пороговых напряжений с шагом в 10мВ, в тексте работы приводятся графики для трех различных пороговых напряжений, которые наиболее полно характеризуют процессы, происходящие в акустическом тракте прибора. Максимальное значение порогового напряжения определяется максимальным уровнем принятых сигналов. Вследствие существенной разницы в частоте, амплитуда сигналов будет существенно отличаться даже на небольшом расстоянии.



а



б



в

Рисунок 2.15 – Зависимость погрешности контроля расстояния от частоты сигнала для дистанции 1 м с одинаковым коэффициентом усиления для обоих частот (а – $U_{пор}/U_{max}$=0,1; б – $U_{пор}/U_{max}$=0,3; в – $U_{пор}/U_{max}$=0,5). Красная сплошная линия – с фазовой коррекцией, черная пунктирная линия – без фазовой коррекции

Из рисунка 2.15 становится очевидно, что при работе с сигналами с одинаковым коэффициентом усиления для обоих частот с увеличением второй частоты существенно сокращается измерительный диапазон, при котором погрешность контроля не превышает четверти периода. Также почти во всем диапазоне частот происходит срабатывание компаратора в разных по номеру периодах для сигналов разных частот, вследствие чего существенно повышается погрешность контроля. Результаты исследования показывают, что необходимо использовать предварительную обработку сигналов до момента проведения вычислений. Следующим этапом проведено исследование влияния АРУ на точность контроля.

Графики сигналов при наличии АРУ показаны на рисунке 2.16.

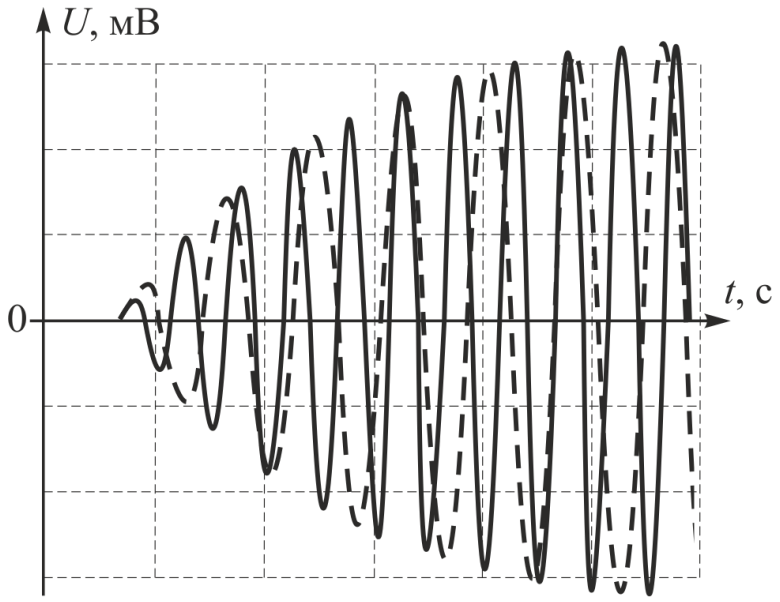
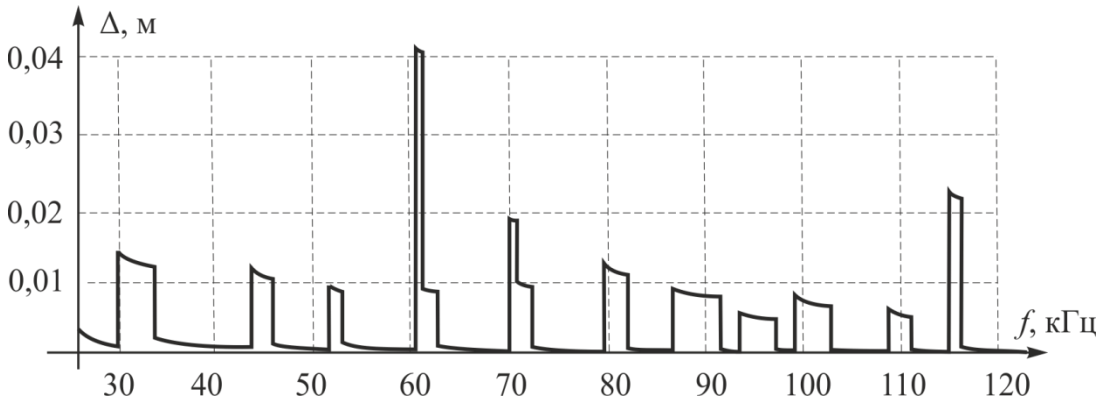
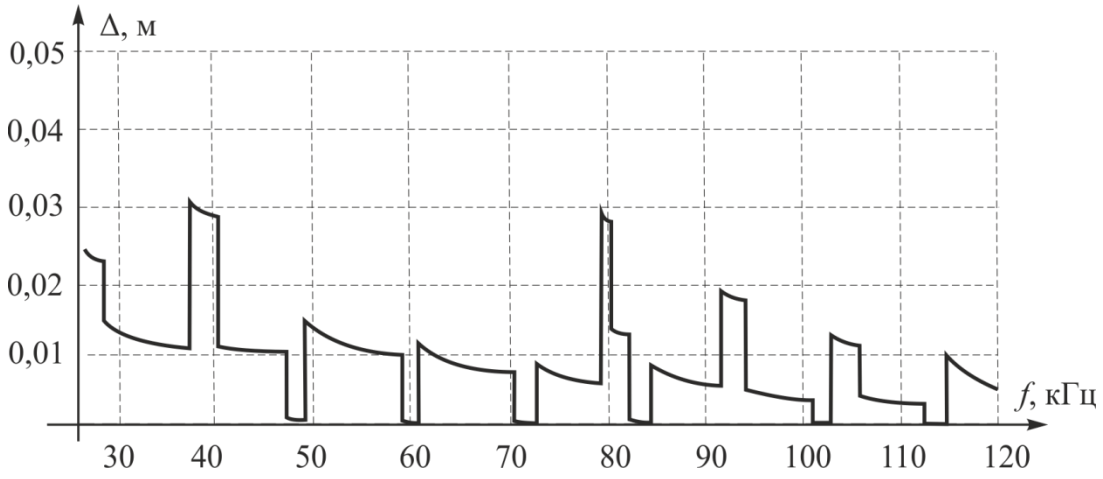


Рисунок 2.16 – Выравнивание сигналов двух частот по амплитуде

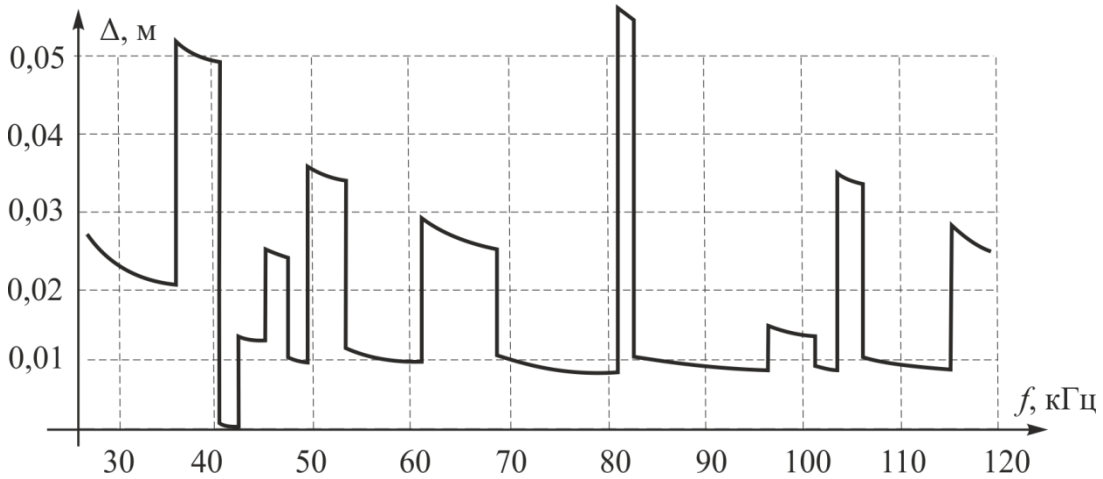
Применение АРУ приведет к выравниванию сигналов по амплитуде, как следствие к расширению диапазона порогового напряжения, но в тоже время не полностью исключит срабатывания компаратора в разных периодах, что может привести к повышению погрешности. Результаты моделирования по определению зависимости погрешности контроля расстояния от частоты сигнала при разных пороговых напряжениях ($U_{пор}/U_{max}$=0,1; $U_{пор}/U_{max}$=0,3; $U_{пор}/U_{max}$=0,5), изображены на рисунке 2.17. Как и в предыдущем случае, уровни пороговых напряжений для демонстрации протекающих процессов выбраны для двух крайних и одного промежуточного случая. Дальнейшее увеличение порогового напряжения оказывает существенное влияние на точность контроля и не подходит для реализации контролирующего оборудования, в связи с чем в тексте работы не приводится.



а



б



в

Рисунок. 2.17 – Зависимость погрешности контроля расстояния от частоты сигнала для различных пороговых напряжений компаратора, а – $U_{пор}/U_{max}$=0,1; б – $U_{пор}/U_{max}$=0,3; в – $U_{пор}/U_{max}$=0,5

Применение АРУ позволяет снизить погрешность во всем диапазоне частот, однако не приводит к исключению срабатывания компаратора в разных периодах эхо-сигналов. При увеличении порогового напряжения разность в номерах периодов, в которых произошло срабатывание компаратора, увеличивается, что приводит к увеличению погрешности контроля.

Индивидуальная настройка коэффициента усиления для каждого канала позволит получить одинаковую амплитуду напряжения эхо-сигналов разных частот, что в свою очередь приведет к равенству одноименных периодов. Этот случай продемонстрирован на рисунке 2.18.

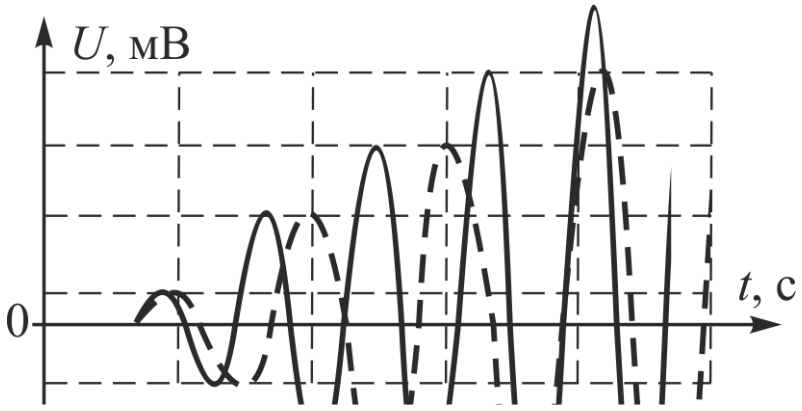


Рисунок. 2.18 – Результат подбора коэффициентов усиления для каждой частоты

Однако даже абсолютное равенство амплитуд сигналов разной частоты не исключает вероятность срабатывания компаратора в разных периодах при обработке информации в цифровой форме. Это явление связано с потерей части информации при преобразовании из аналоговой в цифровую форму, может быть исключено при аналоговой обработке принятых сигналов, но при этом существенно скажется на масса-габаритных параметрах схемы. Детектирование сигналов аналоговым компаратором не даст гарантии того, что переключение будет происходить в одинаковых по счету периодах. Это связано с возможным изменением формы огибающей эхо-сигналов разных частот за счет отражения от поверхности, сопоставимой по размерам с длиной волны для одной частоты зондирования и меньше длины волны для другой частоты зондирования. В тоже

время цифровая фильтрация показала существенные преимущества перед аналоговой, поэтому предпочтительно проводить детектирование сигналов и их обработку в цифровом виде. 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 рисунках 2.19 и 2.20.

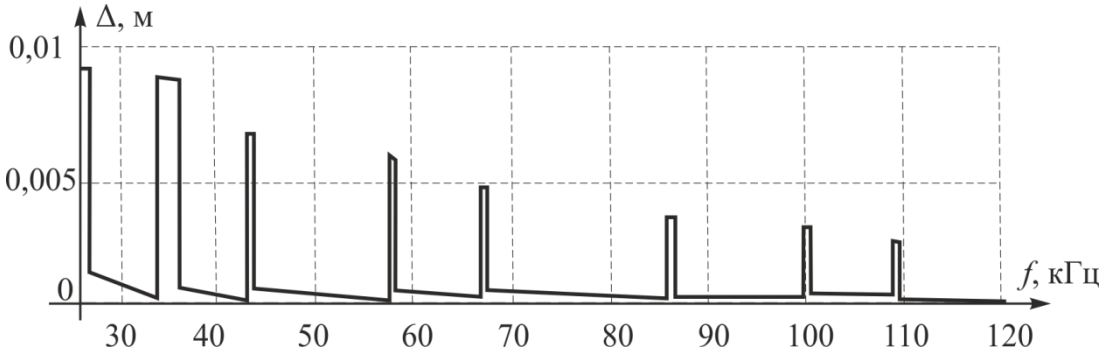


Рисунок 2.19 – Зависимость погрешности контроля от частоты. $U_{пор}/U_{max}$=0,1, дистанция 1 м

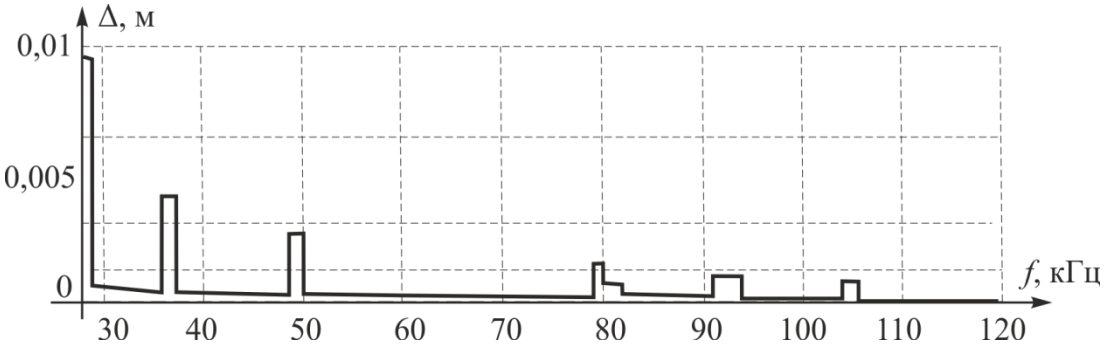


Рисунок 2.20 – Зависимость погрешности контроля от частоты. $U_{пор}/U_{max}$=0,3, дистанция 1 м

Зависимости погрешности от значения второй излучаемой частоты при f_1=40кГц приведены на рисунках 2.21 и 2.22.

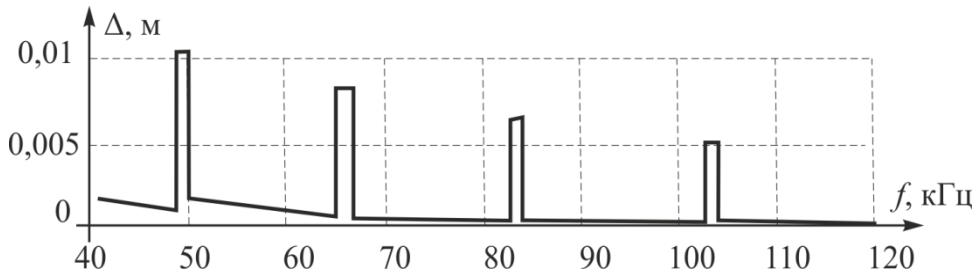


Рисунок 2.21 – Зависимость погрешности контроля от частоты. $U_{пор}/U_{max}$=0,1, f_1=40кГц, дистанция 1 м

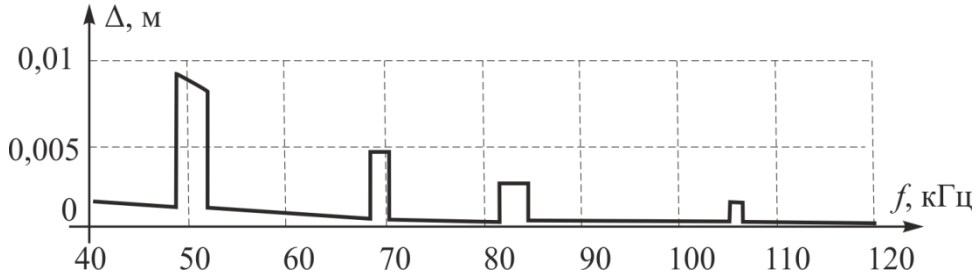


Рисунок 2.22 – Зависимость погрешности контроля от частоты. $U_{пор}/U_{max}$=0,3, f_1=40кГц, дистанция 1 м

Из проведенных исследований становится очевидно, что излучение частот 25 и 40 кГц позволяют обеспечить наименьшую погрешность контроля. При выборе датчиков на 25 и 80 кГц возникают случаи искажения результата при определенных пороговых напряжениях.

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

При срабатывании компаратора в разных периодах временная разность t_1–t_2 будет отрицательная уже в первой итерации, что можно использовать для корректировки итерационной матрицы.

Соотношение частот 25 и 40 кГц является оптимальным для расстояний от 20 см до 2 метров.

Исключить случаи влияния на результат обработки срабатывания компаратора в разных по счету периодах сигнала позволит коррекция

итерационной матрицы (2.2). При условии, что $t_2 - t_1 < 0$, необходимо вычесть то количество периодов к временной координате 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 построение первой итерационной матрицы получим $t'_1 = t_1 - j\ T_1$.

После этого первоначальная итерационная матрица примет вид:

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

График погрешности при введении корректировки в алгоритм показан на рисунке 2.23.

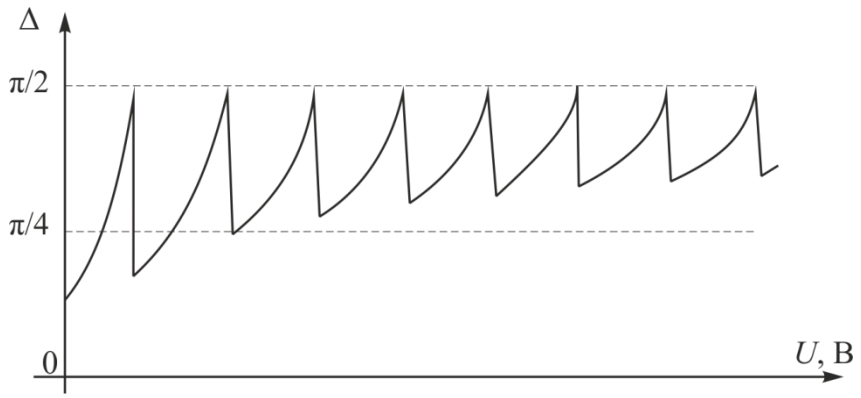


Рисунок 2.23 – Зависимость погрешности контроля от уровня порогового напряжения компаратора после выполнения коррекции результата

После реализации нового итерационного алгоритма погрешность способа будет определяться только фазой сигнала, в который произошло срабатывание компаратора.

2.2.3 Исследование влияния порогового напряжения и измеряемого расстояния на точностные характеристики способа

Время срабатывания компаратора для одного того же сигнала зависит от способа его обработки: одинаковый коэффициент усиления для сигналов двух частот, применение автоматической регулировки усиления, фиксированные коэффициенты усиления для каждой частоты и дистанции.

При одинаковом коэффициенте усиления для каждой частоты возникает существенная разность в амплитуде одинаковых по счету периодов, с увеличением порогового напряжения она возрастает, поэтому применение фиксированных одинаковых коэффициентов усиления не желательно. В основу исследований легли частоты равные 25 и 40 кГц, как частоты, при которых обеспечивается более высокая точность. Зависимость точности от частоты показана в предыдущем параграфе.

На рисунке 2.24 показан случай, когда сигналы двух частот поступают на блок автоматической регулировки усиления, при этом АРУ не исключает срабатывания компаратора в разных периодах для сигналов разных частот, хоть и существенно сокращает диапазон повышенных ошибок контроля.

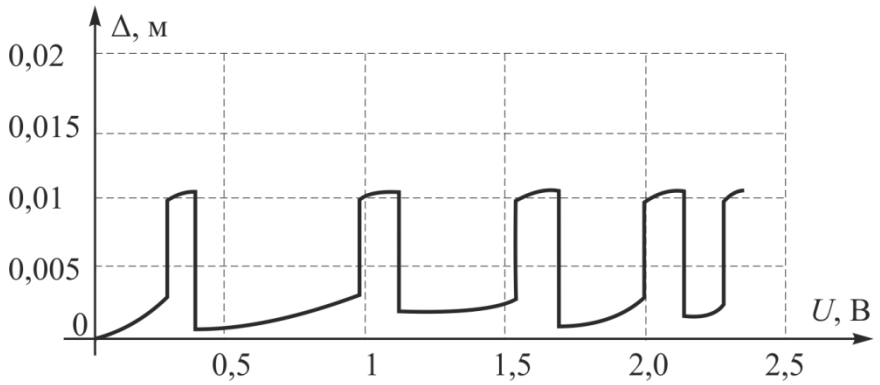
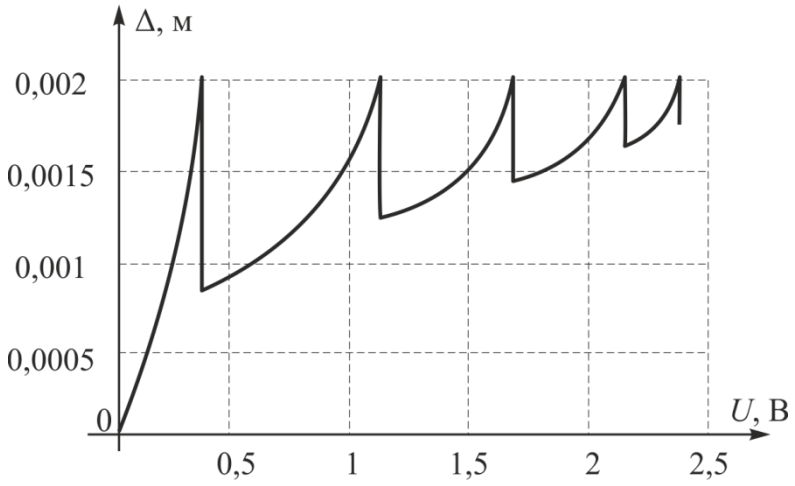
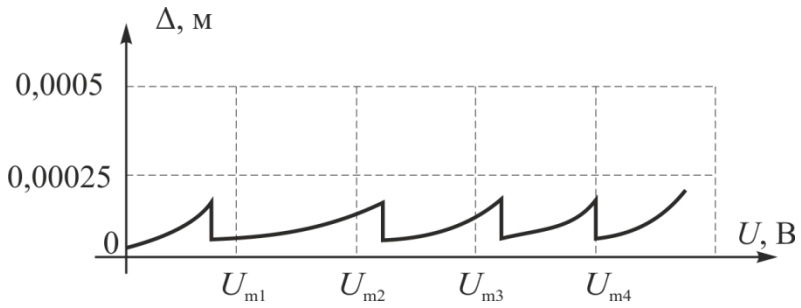


Рисунок 2.24 – Погрешность контроля дистанции в зависимости от порогового напряжения при применении АРУ. Расстояние – 1 м, частоты – 25 и 40кГц

При применении фиксированных коэффициентов усиления сигналов погрешность контроля будет определяться только фазой сигнала, в которой произошло срабатывание компаратора, если будут полностью исключены моменты несвоевременного срабатывания одного из компаратора.



а



б

Рисунок 2.25 – График погрешности при настроенных фиксированных значениях коэффициента усиления до (а) и после (б) фазовой коррекции. Расстояние – 1 м, частоты – 25 и 40кГц

Необходимо задаваться напряжением выше уровня шумов, но как можно ниже. При введении нового итерационного алгоритма точность контроля не зависит от уровня порогового напряжения, которое не должно превышать амплитуды сигналов двух частот.

При изменении расстояния до контролируемого объекта будет меняться соотношение амплитуд сигналов, как следствие будет возрастать диапазон повышенной погрешности контроля в случае применения АРУ (Рисунок 2.26).

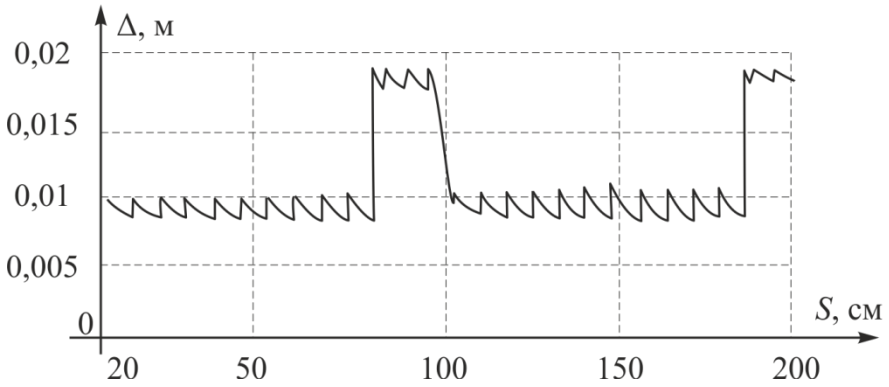


Рисунок 2.26 – Погрешность контроля в зависимости от расстояния при применении АРУ. Частоты – 25 и 40 кГц, пороговое напряжение – $U_{пор}/U_{max}$=0,3

При применении фиксированных коэффициентов усиления для заданного расстояния точность будет определяться только фазой, при которой произойдет срабатывание компаратора и точностью ее детектирования. При этом

погрешность контроля существенно возрастает в отличие от способа с использованием АРУ (Рисунок 2.27 и 2.28).

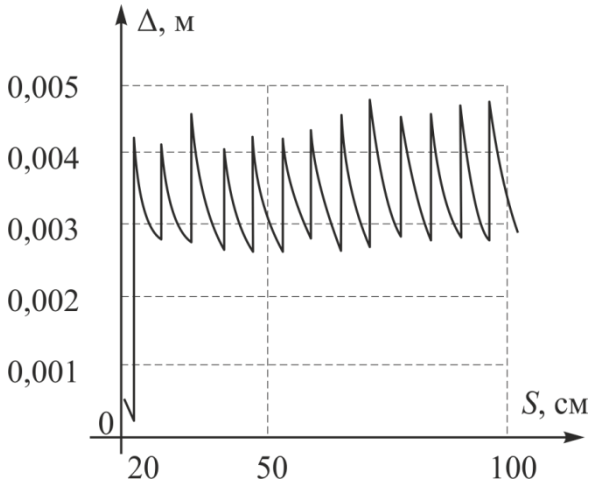


Рисунок 2.27 – Погрешность контроля при фиксированном коэффициенте усиления по каждому каналу. Частоты – 25 и 40 кГц, пороговое напряжение – $U_{пор}/U_{max}$=0,2

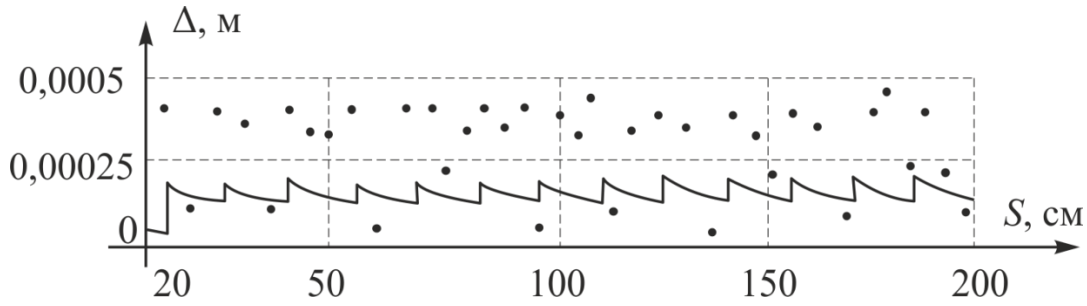


Рисунок 2.27 – Погрешность контроля при фиксированном коэффициенте усиления по каждому каналу с фазовой коррекцией. Частоты – 25 и 40 кГц, пороговое напряжение – $U_{пор}/U_{max}$=0,2. Сплошная – теоретический график, точки - эксперимент

При увеличении порогового напряжения возрастает погрешность при любом способе усиления сигнала, из чего можно рекомендовать выбирать пороговое напряжение выше уровня шумов, чтобы не допустить ложного срабатывания компаратора до момента прихода сигнала, в тоже время необходимо задаваться как можно меньшим уровнем напряжения.

Автоматическая регулировка усиления приводит не только к увеличению ошибки контроля, а еще и к существенному затягиванию сигнала по времени, что в свою очередь окажет негативное действие при реконструкции изображения трехмерного объекта, так как не позволит отличить сигналы от верхней доски с сигналом, отраженным от конвейера.

Для качественного контроля необходимо производить подбор коэффициентов усиления для выбранных частот и заданного диапазона расстояния до объекта контроля.

2.3 Детектирование фазы сигнала при двухчастотном зондировании объекта контроля

Как было показано в параграфах 2.1 и 2.2, снизить вероятность срабатывания компаратора в разных периодах помогает введенный в блок обработки сигнала модуль задания индивидуальных коэффициентов усиления, который позволит выровнять сигналы по амплитуде в каждом периоде [86].

Существенно повысить точность контроля дистанции при двухчастотном способе зондирования с расширенной итерационной матрицей позволит определение фазы сигнала, в которую произошло срабатывание компаратора.

Определение фазы происходит на основе измерения времен длительности импульсов на выходе компаратора, что продемонстрировано на рисунке 2.29.

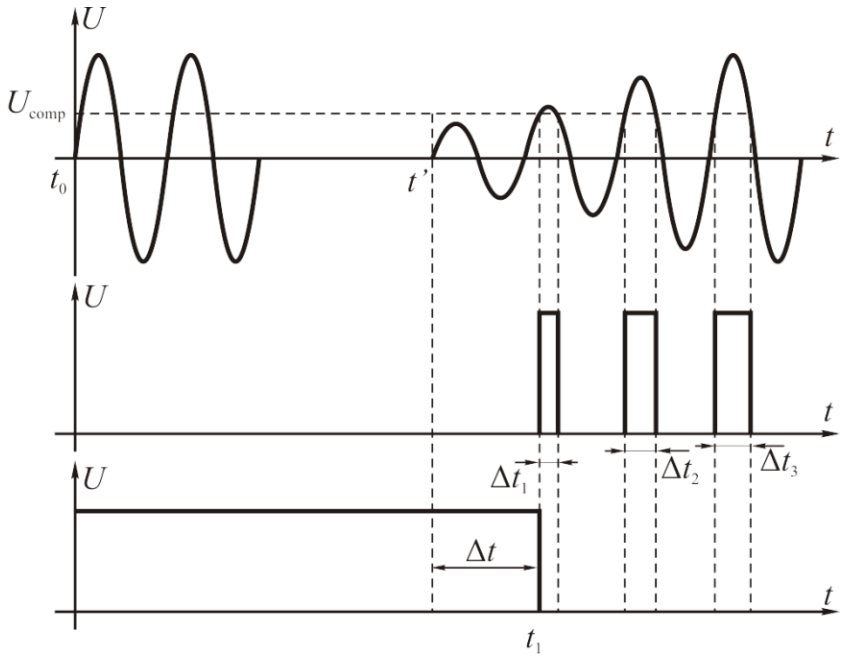


Рисунок 2.29 – Иллюстрация принципа фазового детектирования

Для исследования влияния фазы сигнала на точность контроля были смоделированы идеальные сигналы разных частот от 40 кГц до 45 кГц. Форма сигналов получена на математической модели при условии подбора коэффициентов усиления для каждой частоты, обеспечивающей равенство амплитуд одноименных периодов. Максимальная амплитуда моделированных сигналов равнялась 2 В. Уровень срабатывания компаратора был выбран равным 1 В для более адекватного определения времени его срабатывания.

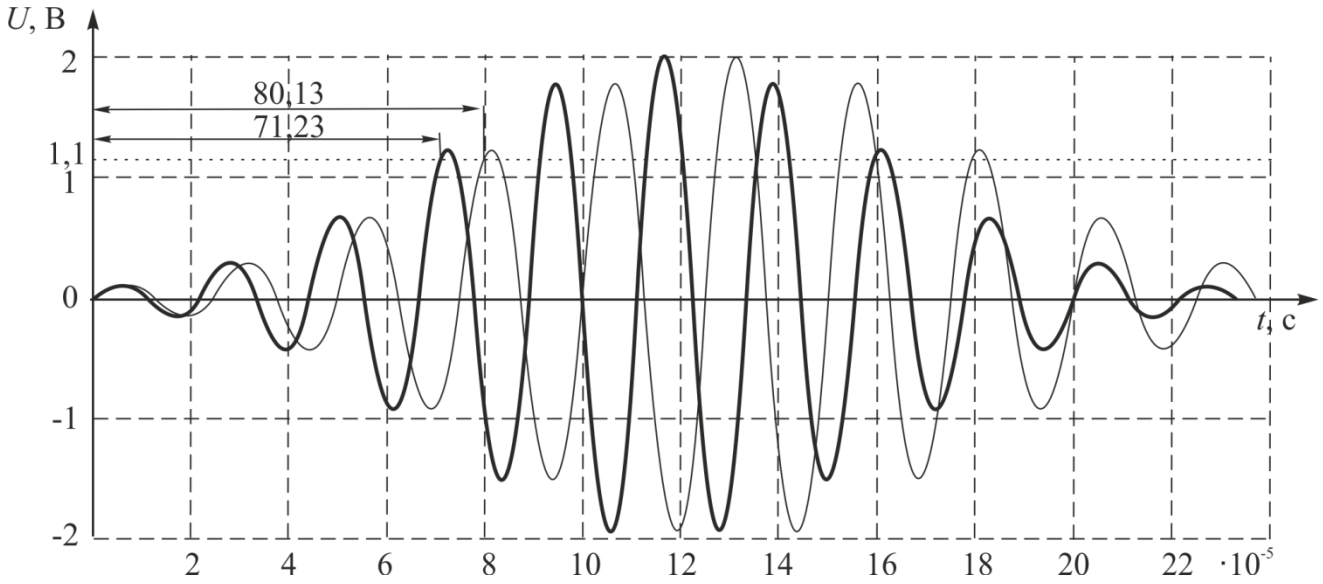


Рисунок 2.30 – Моделированные эхо-сигналы с частотой 40 кГц и 45 кГц

На рисунке 2.30 изображены два идеальных эхо-сигнала с частотой 40 кГц и 45 кГц. Компаратор срабатывает при превышении сигналом заданного порогового напряжения. При этом длительность первого временного интервала t_1 равно 71,23 мкс при частоте сигнала 45 кГц и 80,13 мкс при 40 кГц соответственно. Ниже представлена таблица 2.1, в которую занесены временные координаты срабатывания компаратора сигналов с разными частотами.

Таблица 2.1 – Временные координаты срабатывания компаратора

f, кГц	T, мкс	Δt_i, мкс	$\Delta t_{спада}$, мкс
80	1,25	40,07	41,48
45	2,222222	71,23	73,74
43	2,325581	74,53	77,17
42	2,380952	76,32	79,01
41	2,439024	78,19	80,94
40	2,5	80,13	82,96
38	2,631579	84,36	87,33
37	2,702703	86,64	89,7
36	2,777778	89,04	92,19
35	2,857143	91,58	94,82
20	2,5	160,27	165,92

f, кГц – частота эхо-сигнала;
T, мкс – период эхо-сигнала;
Δt_i, мкс – время фронта эхо-сигнала в момент до срабатывания компаратора;
$\Delta t_{спада}$, мкс – время спада эхо-сигнала в момент срабатывания компаратора

Для того чтобы определить момент прихода эхо-сигнала t_0' необходимо вычислить на каком полупериоде сигнал превысил уровень срабатывания компаратора. Чтобы определить полупериод используем формулу (2.10) которая описана ниже

$$(\Delta t_1 - (i-1)\cdot T_1) - (\Delta t_2 - (i-1)\cdot T_2) = \min \qquad (2.10)$$

где $\Delta t_1 = 71{,}23\cdot 10^{-6}$ с;

$\Delta t_2 = 80{,}13\cdot 10^{-6}$ с;

$T_1 = 23{,}25581\cdot 10^{-6}$ с;

$T_2 = 25\cdot 10^{-6}$ с;

$i = 1\ldots 8$.

Для экспериментального определения полупериода используются значения i от 1 до 8. Находим разность S между моментами прихода двух сигналов с разной частотой при восьми значениях i (1…8), полученные данные вносим в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Значения разности S между моментами прихода двух сигналов

f, кГц	S, $\cdot 10^{-5}$с								
	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	min
45	0,89	0,6122	0,3344	0,0566	-0,221	-0,498	-0,776	-1,054	0,0566

Из приведенных значений найдем минимальное положительное значение и определим, при каком значении i оно получено. Минимум получен при i = 4, что соответствует действительности. Для подтверждения достоверности способа определения временной координаты проделаем расчет для сигналов с другой частотой и запишем данные в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Значения разности S между моментами прихода двух сигналов

f, кГц	S, $\cdot 10^{-5}$с								
	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	Min
80	4,006	2,756	1,506	0,256	-0,994	-2,244	-3,494	-4,744	0,256
43	0,560	0,386	0,211	0,037	-0,138	-0,312	-0,487	-0,661	0,037
42	0,381	0,262	0,143	0,024	-0,095	-0,214	-0,333	-0,452	0,024
41	0,194	0,133	0,072	0,011	-0,050	-0,111	-0,172	-0,233	0,011

38	0,423	0,291	0,160	0,028	-0,103	-0,235	-0,366	-0,498	0,028
37	0,651	0,448	0,246	0,043	-0,160	-0,363	-0,565	-0,768	0,043
36	0,891	0,613	0,335	0,058	-0,220	-0,498	-0,776	-1,053	0,058
35	1,145	0,788	0,431	0,074	-0,284	-0,641	-0,998	-1,355	0,074
20	8,014	5,514	3,014	0,514	-1,986	-4,486	-6,986	-9,486	0,514

Для расчета выше приведенных результатов одним из эхо-сигналов используется сигнал с частотой 40 кГц. Для уменьшения максимальной ошибки метода необходимо от вычисленного значения времени прихода эхо-сигнала с меньшей частотой отнимать вычисленное значение времени прихода эхо-сигнала с большей частотой.

После чего определяем момент прихода эхо-сигнала t_0' по формуле:

$$t_0^{'} = \Delta t_i - (i-1)\cdot T, \tag{2.11}$$

Все вычисленные значения заносим в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Вычисленные значения момента прихода эхо-сигналов

f, кГц	T, мкс	t_0', мкс
80	12,5	2,57
45	22,22222	4,56333
43	23,25581	4,76256
42	23,80952	4,89143
41	24,39024	5,01927
40	25	5,13
38	26,31579	5,41263
37	27,02703	5,55892
36	27,77778	5,70667
35	28,57143	5,86571
20	50	10,27

Из таблицы видно, что максимальная ошибка не превышает четверти периода, причем с увеличением порога срабатывания компаратора диапазон ошибки будет стремиться в сторону максимальной, т.е. к четверти периода.

В реальности сигнал, приходящий с УЗ датчика не является идеальным, так как на него накладываются шумовые помехи широкого спектра частот, при

отражении сигнала от объекта контроля происходит его искажение, да и сами датчики имеют разные характеристики. Для того чтобы определить величину возникновения ошибки при определении момента прихода реального эхо-сигнала необходимо исследовать модель сигнала с наложенным шумом. В целях проведения исследований было проведено исследование влияния шумов на точность определения дистанции [87].

На рисунке 2.31 изображены два эхо-сигнала с наложенными шумовыми помехами. Амплитуда шумовых помех в 10 раз меньше амплитуды самого сигнала, а частота в 10 раз больше.

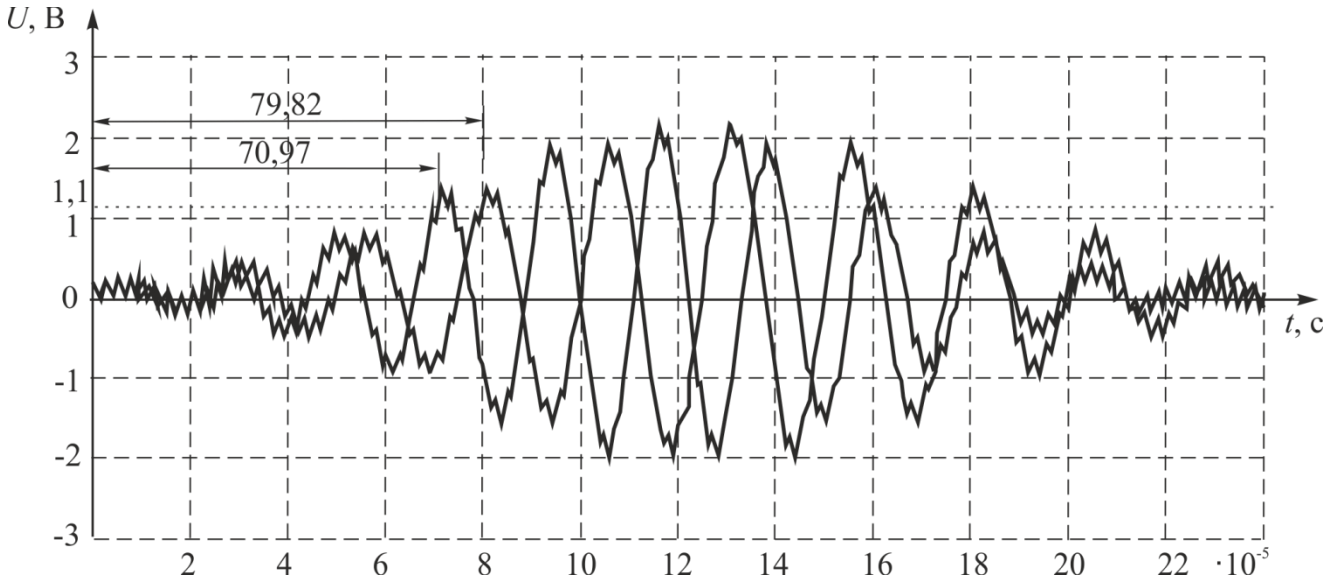


Рисунок 2.31 – Моделированные зашумленные эхо-сигналы с частотой 40 кГц и 45 кГц, амплитуды сигнала к амплитуде шума 100 мВ.

На графике видно, длительность первого временного интервала t_1 и второго t_2, равны 70,97 мкс и 79,82 мкс при частоте сигнала 45 кГц и 40 кГц соответственно. Подобным образом были промоделированы сигналы других частот, с различным отношением сигнал-шум. Затем были измерены временные интервалы каждого сигнала до момента срабатывания компаратора. Все измеренные величины занесены в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Временные интервалы сигналов с наложенными помехами

$f_{сигн}$, кГц	Δt_i, $\cdot 10^{-5}$ с					
	$f_{шума}$ в 10 раз больше $f_{сигнала}$			$f_{шума}$ в 20 раз больше $f_{сигнала}$		
	$\frac{сигнал}{шум}=2$	$\frac{сигнал}{шум}=5$	$\frac{сигнал}{шум}=10$	$\frac{сигнал}{шум}=2$	$\frac{сигнал}{шум}=5$	$\frac{сигнал}{шум}=10$
80	1,409	3,903	3,99	1,45	3,941	3,952
45	2,502	6,934	7,097	2,583	7,008	7,024
43	2,61	7,258	7,428	2,585	7,327	7,345
42	2,898	7,435	7,601	2,762	7,504	7,52
41	2,74	7,615	7,793	2,832	7,684	7,703
40	2,813	7,806	7,982	3,027	7,882	7,894
38	3,198	8,208	8,405	3,198	8,292	8,314
37	3,293	8,433	8,626	3,137	8,522	8,536
36	3,377	8,664	8,87	3,225	8,754	8,773
35	3,479	8,92	9,122	3,321	9,005	9,025
20	5,642	15,6	15,954	5,56	15,76	15,786

По данным, представленным в таблице по формуле (2.10) определяем период эхо-сигнала, в котором сработал компаратор. При отношении амплитуды сигнала к амплитуде шума (SNR) равное 2 уровень в 1 В был превышен на втором периоде, при остальных отношениях амплитуды сигнала к амплитуде шума компаратор срабатывал на 4 периоде эхо-сигналов.

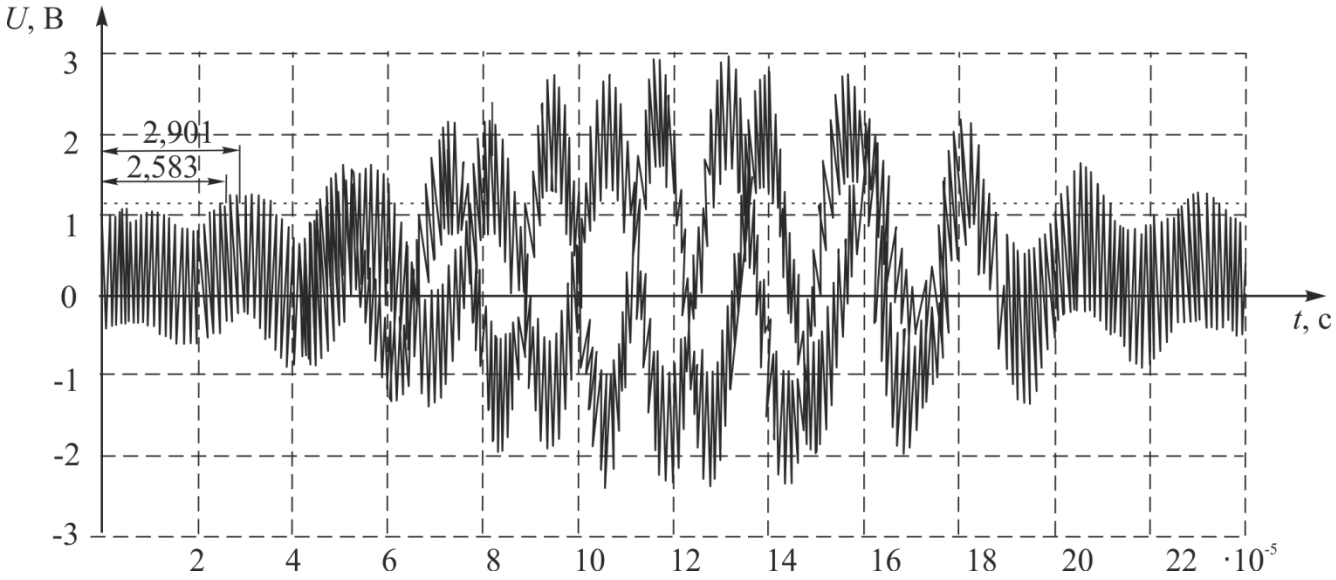


Рисунок 2.32 – Моделированные зашумленные эхо-сигналы с частотой 40 кГц и 45 кГц, отношение амплитуды сигнала к амплитуде шума равное 2

Зная в каком периоде сработал компаратор, можно определить t_0' по формуле (2.10) для каждого из сигналов с разными отношениями сигнал-шум. Результаты вычислений представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Вычисленные значения момента прихода эхо-сигнала

$f_{сигн}$, кГц	T, мкс	t_0', $\cdot 10^{-5}$ с					
		$f_{шума}$ в 10 раз больше $f_{сигнала}$			$f_{шума}$ в 20 раз больше $f_{сигнала}$		
		$\frac{сигнал}{шум}=2$	$\frac{сигнал}{шум}=5$	$\frac{сигнал}{шум}=10$	$\frac{сигнал}{шум}=2$	$\frac{сигнал}{шум}=5$	$\frac{сигнал}{шум}=10$
80	12,5	0,159	0,153	0,24	0,2	0,191	0,202
45	22,22	0,280	0,267	0,430	0,361	0,341	0,357
43	23,26	0,284	0,281	0,451	0,259	0,350	0,368
42	23,81	0,517	0,292	0,458	0,381	0,361	0,377
41	24,39	0,301	0,298	0,476	0,393	0,367	0,386
40	25	0,313	0,306	0,482	0,401	0,382	0,394
38	26,32	0,566	0,313	0,510	0,566	0,397	0,419
37	27,03	0,590	0,325	0,518	0,434	0,414	0,428
36	27,78	0,599	0,331	0,537	0,447	0,421	0,440
35	28,57	0,622	0,349	0,551	0,464	0,434	0,454
20	50	0,642	0,600	0,954	0,560	0,760	0,786

Было выявлено, что при отношении амплитуды сигнала к амплитуде шума равное 2 с частотой шума в 10 и 20 раз больше частоты самого эхо-сигнала отклонение измеренных значений от истинного времени прихода эхо-сигнала достигает 40%. В связи с этим, пришедший эхо-сигнал с датчика необходимо фильтровать от наложенных на него помех.

Для повышения точности ультразвукового контроля необходимо определить момент прихода эхо-сигнала с наибольшей точностью, чтобы этого достичь был предложен способ детектирования фазы. Принцип которого заключается в определении временного интервала от точки t_0 (точка пересечения синусоиды с осью абсцисс) до точки t_0'. Временной интервал можно вычислить из уравнения:

$$\frac{T}{2} = 2 \cdot \Delta t_{нач} + \Delta t_{изм}, \qquad (2.12)$$

где T – период сигнала;

$\Delta t_{нач}$ – интервал между нулевой точкой t_0 эхо-сигнала и вычисленной точкой t_0';

$\Delta t_{изм}$ – длительность логической единицы на выходе компаратора измеряемого полупериода;

Для вычисления $\Delta t_{нач}$ преобразуем уравнение:

$$\Delta t_{нач} = \frac{\frac{T}{2} - \Delta t_{изм}}{2}. \qquad (2.13)$$

Чтобы осуществить вычисление необходимо знать $\Delta t_{изм}$, которое равняется длительности логической единицы на выходе компаратора, т.е. это временной интервал, когда сигнал превышает опорное напряжение компаратора в одном полупериоде синусоиды. Это проиллюстрировано на рисунке 2.33.

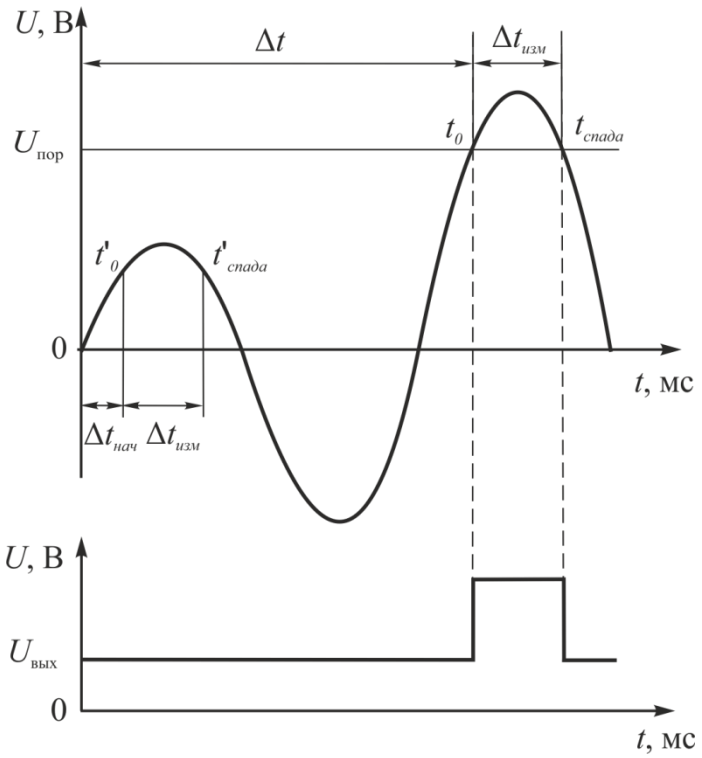
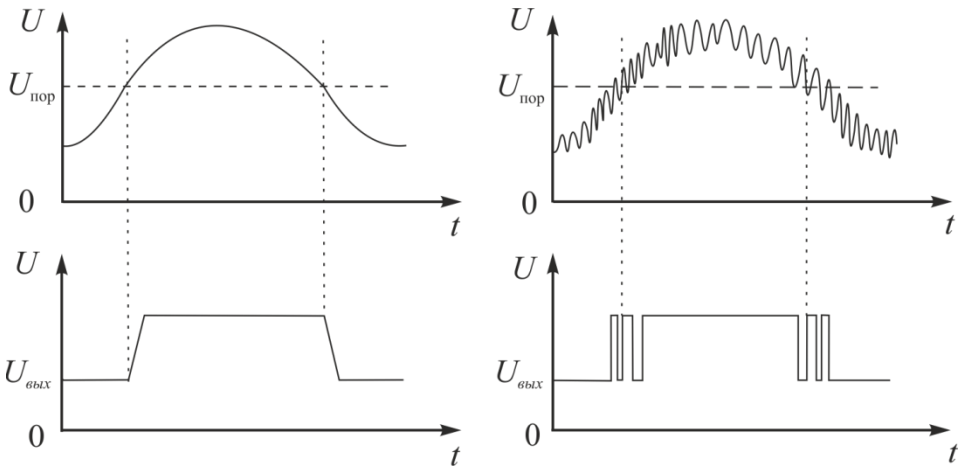


Рисунок 2.33 – Эхо-сигнал (а) и выходное напряжение компаратора (б)

При наличии шумов в акустическом или электрическом трактах возможно многократное срабатывание компаратора, так называемый «дребезг». Рисунок 2.34 иллюстрирует описанную выше ситуацию для случая отношения сигнал-шум (SNR) равном 0 (рис. 2.34.*а*) и для случая SNR=4 (рис. 2.34.*б*). Для борьбы с явлением дребезга применяется положительная обратная связь, которая охватывает усилитель с большим коэффициентом усиления. В результате получаем компаратор, у которого уровни включения и выключения не совпадают, а различаются на величину, называемую гистерезисом $U_г$.



а б

Рисунок 2.34 – Диаграмма не зашумленного входного сигнала *а* и входного сигнала с заметным шумом *б*

В случае применения гистерезиса возникает следующая проблема, измеренный временной отрезок не является достоверным, это объясняется тем, что компаратор срабатывает чуть позже из-за сниженного его порогового уровня срабатывания. Для того чтобы этого избежать было предложено использовать два компаратора, один с положительной обратной связью другой без нее [88].

Компаратор без обратной связи определяет точку t_0', когда сигнал превышает пороговое его напряжение $U_{пор1}$. Компаратор с гистерезисом после превышения сигнала порогового напряжения $U_{пор2}$ снижает уровень его срабатывания для избежание многократного срабатывания и фиксирует момент спада (точку $t_{спада}'$) сигнала ниже значения $U_{пор2}$. – $U_г$. Для обеспечения одного

уровня определяемых точек подстраиваем порог срабатывания второго компаратора (без положительной обратной связи) так чтобы: $U_{пор1} = U_{пор2}. - U_г$.

Временные диаграммы зашумленного эхо-сигнала и сигналов на выходе компараторов изображены на рисунке 2.35.

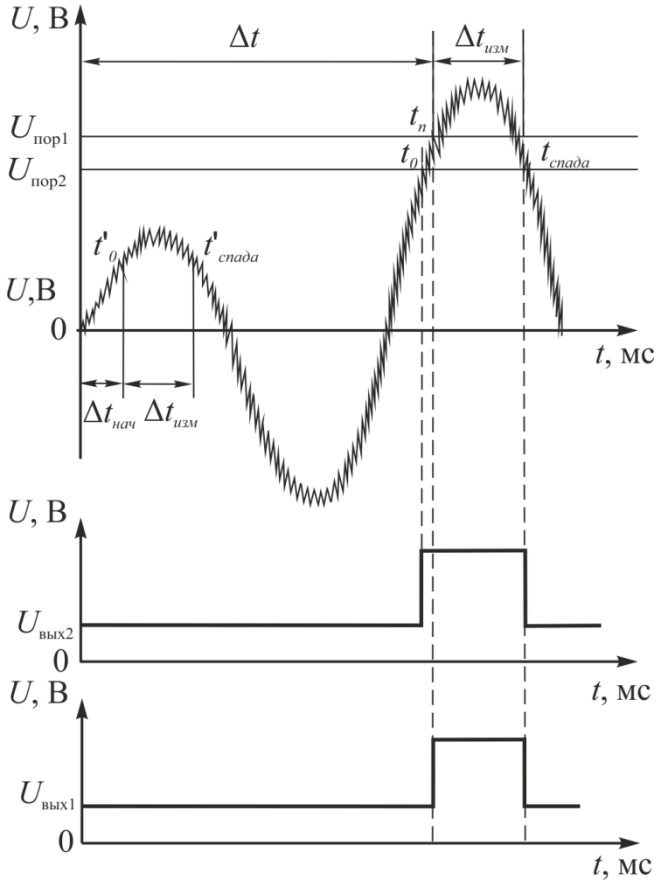


Рисунок 2.35 – Диаграмма зашумленного эхо-сигнала и диаграмма сигналов на выходе компараторов

Использование способа позволяет определить момент прихода эхо-сигнала с большой точностью, что в свою очередь даст возможность наиболее точно определить местоположение дефектов паллет.

Выводы

– Предложенный двухчастотный способ зондирования объекта контроля с фазовой коррекцией для вычисления временной координаты начала эхо-сигналов,

показал существенное повышение точности, более чем в 4 раза по сравнению с аналогами.

– Предложенный способ определения номера периода эхо-сигнала, в котором сработало пороговое устройство, позволяет детектировать временную координату начала эхо-импульса с точностью до четверти периода.

– Полученная расширенная итерационная матрица позволяет выявить и учесть срабатывание компаратора в разных периодах двухчастотных эхо-сигналов, что снижает погрешность контроля.

– Исследование влияние соотношение частот зондирования и уровня порогового напряжения на достоверность контроля позволяют определить оптимальные параметры дефектоскопа.

Глава 3 Экспериментальные исследования

Современные системы контроля геометрических параметров различных изделий широко применяются в различных сферах человеческой деятельности как научной, так и производственной. Получение высоких технических характеристик таких систем контроля обеспечивается за счет оригинальных схемотехнических решений и современных адаптивных алгоритмов обработки эхо-сигналов. В представленной главе описаны результаты исследований, которые проведены автором при проектировании программно-аппаратного комплекса для контроля параметров паллет. Материалы, представленные в третьей главе, нашли отражения в публикациях автора [1, 40, 89 –108].

3.1 Экспериментальная установка

Проверка результатов теоретических исследований, выполненных во второй главе, была проведена на экспериментальной установке, содержащей 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 (рисунок 3.1).

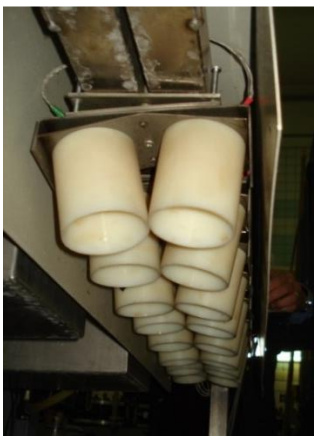


Рисунок 3.1 – Двухчастотная акустическая решетка

Электронный блок (рисунок 3.2) 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 3.2 – Фотография электронного блока программно-аппаратного комплекса для контроля паллет

Структурная схема электронного блока показана на рисунке 3.3.

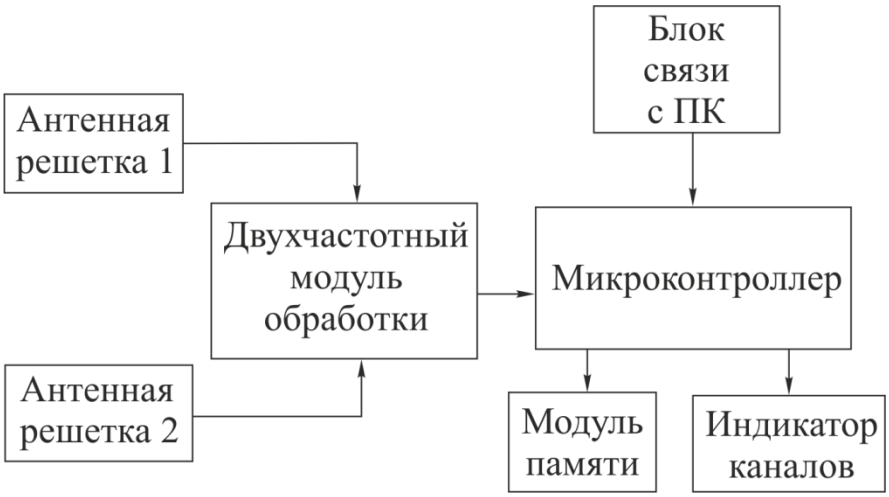


Рисунок 3.3 – Структурная схема электронного блока

Двухчастотный модуль обработки эхо-сигналов (рисунок 3.4) состоит из блока управления 1 (УПР), соединенного с первым генератором зондирующих импульсов 2 (ГЕН1) и вторым генератором зондирующих импульсов 3 (ГЕН2). Первый генератор импульсов 2 (ГЕН1) своим выходом соединен с излучателем 4 (ИЗЛ1), излучающим импульс на первой частоте, а второй генератор импульсов 3

(ГЕН2) к второму излучателю 5 (ИЗЛ2), излучающим импульс на второй частоте. Первый приемник 6 (Пр1), настроенный на первую частоту, своим выходом подключен к первому усилителю эхо-сигналов 7 (Ус1), усиливающему сигнал только первой частоты. Выход этого усилителя эхо-сигналов 7 (Ус1) подключен к входу первого компаратора 8 (К1). Второй вход этого компаратора 8 (К1) соединен с источником опорного напряжения 9 (REF). Выход первого компаратора 8 (К1) подключен к первому формирователю временного интервала 11 (ФВИ1) и к первому измерителю временного интервала 10 (ИВИ1). Второй вход формирователя временного интервала 11 (ФВИ1) подключен к блоку управления 1 (УПР). Первый формирователь временного интервала 11 (ФВИ1) своим выходом соединен со вторым измерителем временного интервала 12 (ИВИ2), который в свою очередь своим выходом соединен с блоком управления 1 (УПР). Первый измеритель временного интервала 10 (ИВИ1) своим выходом соединен с блоком управления 1 (УПР). Рассмотренная структура составляет основу первого канала приема, усиления и преобразования акустического сигнала. Аналогичную структуру имеет и второй канал приема, усиления и преобразования акустического сигнала. Второй приемник 13 (Пр2), принимающий сигналы только на второй частоте, своим выходом связан с входом второго усилителя 14 (Ус2), усиливающего только вторую частоту, а его выход - с вторым компаратором 15 (К2). На второй вход второго компаратора 15 (К2) подается напряжение с источника опорного напряжения 9 (REF). Второй компаратор 15 (К2) своим выходом соединен со вторым формирователем временного интервала 16 (ФВИ2). Другой вход второго формирователя временного интервала 16 (ФВИ2) соединен с блоком управления 1 (УПР). Второй формирователь временного интервала 16 (ФВИ2) своим выходом соединен с третьим измерителем временного интервала 17 (ИВИ3). Его выход связан с блоком управления 1 (УПР). Генератор опорных импульсов 18 (ГОП) соединен с первым измерителем временного интервала 10 (ИВИ1), с вторым измерителем временного интервала 12 и с третьим измерителем временного интервала 17 (ИВИ3). Блок управления 1 (УПР) подсоединен к индикатору 19 (И).

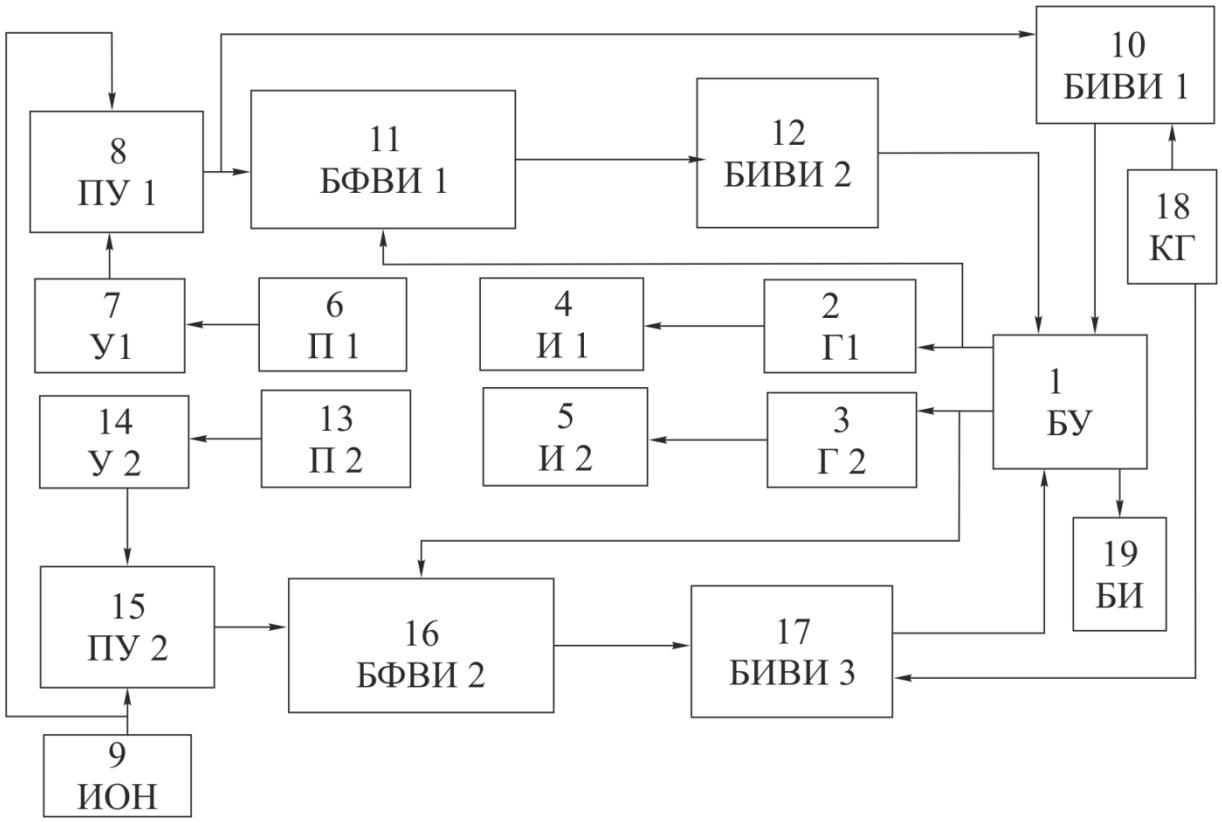


Рисунок 3.4 – Блок обработки двухчастотных эхо-сигналов

Блок обработки двухчастотных эхо-сигналов работает по следующему алгоритму. Вначале блоком управления 1 (УПР) вырабатывается импульс, который запускает первый генератор 2 (ГЕН1). Этот же импульс устанавливает выход первого формирователя временного интервала 11 (ФВИ1) в логическую 1. Выходной сигнал первого генератора 2 (ГЕН1) подается к первому излучателю 4 (ИЗЛ1), который излучает акустический импульс с периодом повторения T_1. Импульс упругих колебаний при распространении в воздушной среде отражается от границ раздела сред и поступает на первый 6 (Пр1) и второй 13 (Пр2) приемники. Однако усиливается он только первым усилителем 7 (Ус1). Усиленный сигнал поступает на вход первого компаратора 8 (К1). На другой вход первого компаратора 8 (К1) подается напряжение от источника опорного напряжения 9 (REF) [109]. Как только напряжение на выходе первого усилителя 7 (Ус1) превысит напряжение источника опорного напряжения U_1, на выходе первого компаратора 8 (К1) сформируется логическая 1, которая сбросит выход

первого формирователя временного интервала 11 (ФВИ1) в логический 0 (точка t_1 на рисунке. 3.5). Таким образом, первый формирователь временного интервала 11 (ФВИ1) на своем выходе сформировал сигнал длительностью:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0,$$

где t_0 – начальный момент времени излучения ультразвукового сигнала первой частоты.

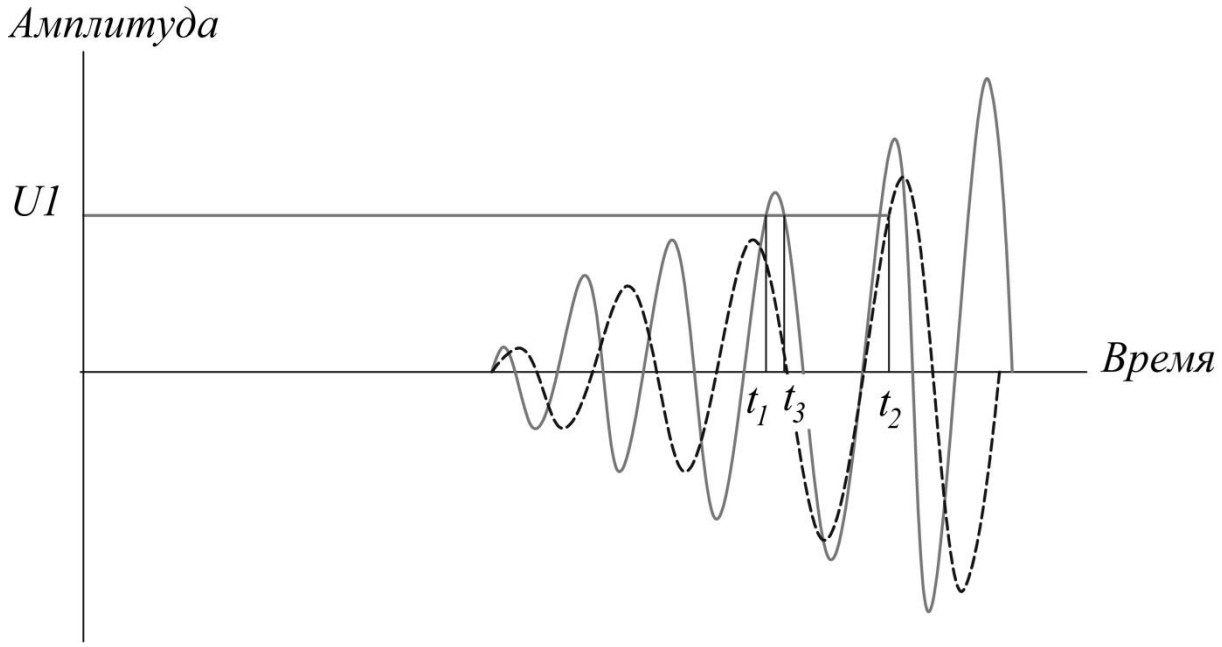


Рисунок 3.5 – Эхо-сигналы на двух частотах

Этот сигнал поступил на второй измеритель временного интервала 12 (ИВИ2), выходные данные с которого поступили в блок управления 1 (УПР). Кроме того логическая 1 на выходе первого компаратора 8 (К1) разрешила работу первого измерителя временного интервала 10 (ИВИ1). При уменьшении выходного напряжения первого усилителя 7 (Ус1) до величины менее U1, на выходе первого компаратора 8 (К1) появляется уровень логического 0, который остановит работу первого измерителя временного интервала 10 (ИВИ1) (точка t_3 на рис. 3.5).

Данные с первого измерителя временного интервала 10 (ИВИ1) используются блоком управления 1 (УПР), в котором вычисляется корректирующее значение:

$$t_к = \left(\frac{T_1}{2} - t \right) / 2 ,$$

где T_1 – период колебаний ультразвукового сигнала первой частоты, с;

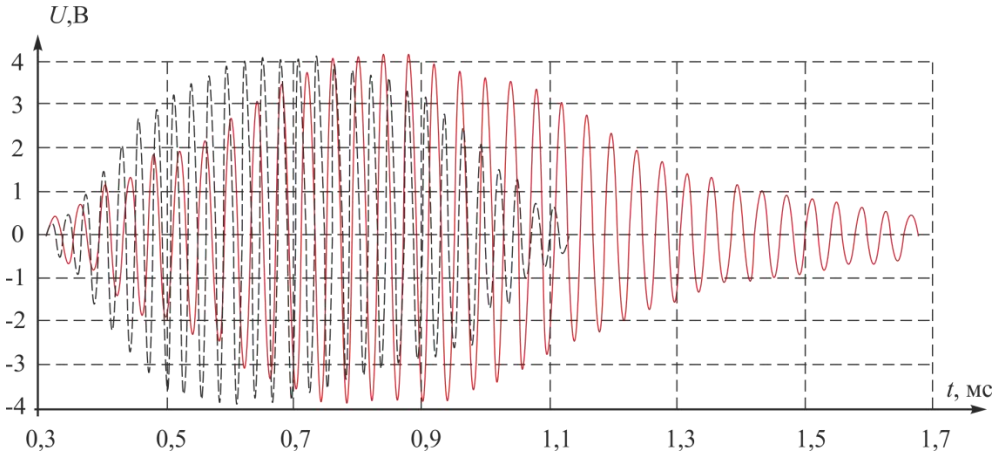
t – временной интервал, в котором мгновенное значение амплитуды принятого ультразвукового сигнала первой частоты превышает пороговый уровень, с.

Затем блоком управления 1 (УПР) вырабатывается сигнал, который запускает второй генератор 3 (ГЕН2). Этим же сигналом второй формирователь временного интервала 16 (ФВИ2) устанавливается в состояние логической 1. Второй генератор 3 (ГЕН2) возбудил второй излучатель 5 (ИЗЛ2), который излучил ультразвуковые сигналы с периодом T_2. Излученный ультразвуковой сигнал распространился по той же контролируемой среде и был принят вторым приемником 13 (Пр2), усилился вторым усилителем 14 (Ус2) и поступил на второй компаратор 15 (К2). Второй вход второго компаратора 15 (К2) соединен с источником опорного напряжения 9 (REF). Как только выходное напряжение второго усилителя 14 (Ус2) превысит опорное напряжение U_1, на выходе второго компаратора 15 (К2) сформируется логическая 1, которая сбросит второй формирователь временного интервала 16 (ФВИ2) в логический 0 (точка t_2 на рисунке 3.5). Таким образом, второй формирователь временного интервала 16 (ФВИ2) на своем выходе сформирует импульс длительностью:

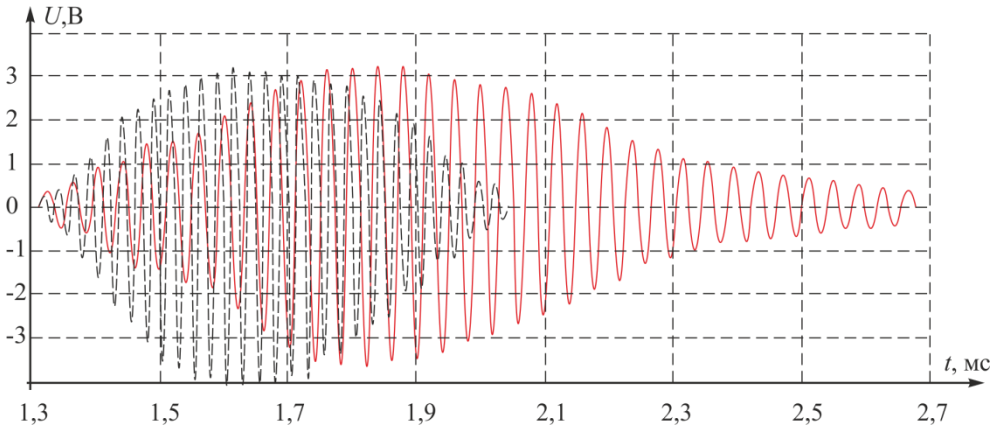
$$\Delta t_2 = t_2 - t_0, \qquad (3.1)$$

Этот сигнал поступил в третий измеритель временного интервала 17 (ИВИ3). Данные о длительности третьего временного интервала поступили в блок управления 1 (УПР).

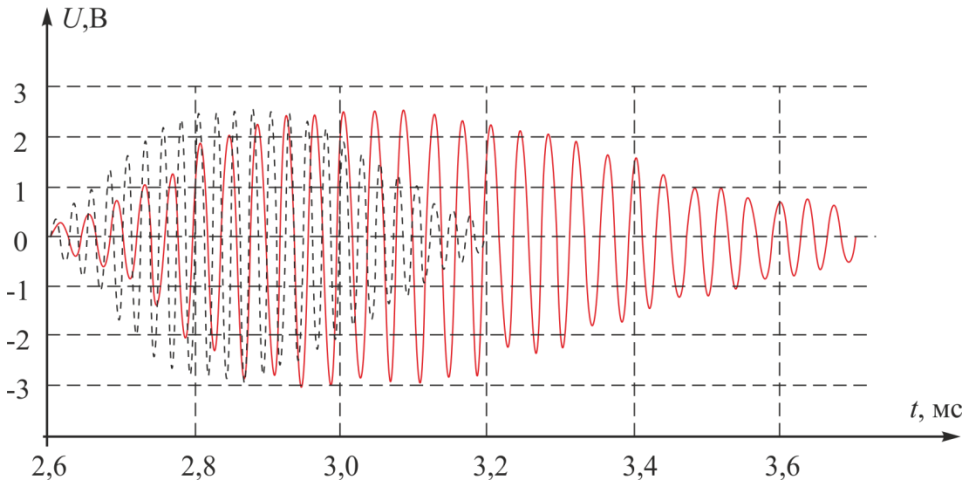
Экспериментальное исследование погрешности системы контроля проводилось путем изменения дистанции до объекта контроля от 10 до 100 см (рисунок 3.6).



а



б



в

Рисунок 3.6 –Эхо-сигналы частотой 25 (красная сплошная линия) и 40 кГц (черная пунктирная), расстояние до объекта контроля: а – 25 см, б – 40 см, в – 100 см

Рассмотрим подробнее случай на рисунке 3.6а. Временные интервалы между излученными и принятыми ультразвуковыми сигналами, измеренные измерителями временных интервалов 12 (ИВИ2) и 17 (ИВИ3), имели длительности:

Δt_1 = 328,7 мкс;

Δt_2 = 326,8 мкс.

Блок управления 1 (УПР) осуществил $\Delta t_1'$ первую коррекцию этих данных в соответствии с выражением:

$$\begin{cases} \Delta t_1' = \Delta t_1 - i \cdot T_1 \\ \Delta t_2' = \Delta t_2 - i \cdot T_2 \end{cases}, \quad (3.2)$$

где T_1 – длительность периода ультразвуковой волны первой частоты;

T_2 – период колебаний ультразвуковой волны второй частоты;

i – номер итерации;

$\Delta t_1'$ – первый временной интервал после первой коррекции;

$\Delta t_2'$ – второй временной интервал после первой коррекции.

Затем блок управления 1 (УПР) осуществил сравнение результатов коррекции:

$$\left|\Delta t_1' - \Delta t_2'\right| < T_1 / 4 \quad (3.3)$$

После коррекции по формулам (3.1) и (3.2) получили следующий набор значений:

1) $\begin{cases} \Delta t_1' = 338,7 - 1 \cdot 1,67 = 337,03 \ \ мкс \\ \Delta t_2' = 336,8 - 1 \cdot 1,11 = 335,69 \ \ мкс \end{cases}$,

$$\left|\Delta t_1' - \Delta t_2'\right| = 1{,}3 \ \textit{мкс} > {1{,}67}/{4}.$$

В результате получили значение, превышающее четверть периода ультразвуковых колебаний.

Блок управления 1 (УПР) осуществил вторую коррекцию этих временных интервалов:

$$2)\ \begin{cases} \Delta t_1' = 338{,}7 - 2 \cdot 1{,}67 = 335{,}36 \ \textit{мкс} \\ \Delta t_2' = 336{,}8 - 2 \cdot 1{,}11 = 334{,}58 \ \textit{мкс} \end{cases},$$

$$\left|\Delta t_1' - \Delta t_2'\right| = 0{,}78 \ \textit{мкс} > {1{,}67}/{4}$$

После второй коррекции (i = 2) получили значение, превышающее четверть периода ультразвуковых колебаний.

Блок управления 1 (УПР) осуществил третью коррекцию этих временных интервалов:

$$3)\ \begin{cases} \Delta t_1' = 338{,}7 - 3 \cdot 1{,}67 = 333{,}69 \ \textit{мкс} \\ \Delta t_2' = 336{,}8 - 3 \cdot 1{,}11 = 333{,}47 \ \textit{мкс} \end{cases},$$

$$\left|\Delta t_1' - \Delta t_2'\right| = 0{,}22 \ \textit{мкс} < {1{,}67}/{4}.$$

После третьей коррекции (i = 3) получили разность времен первого и второго интервала, которая меньше четверти периода ультразвуковых сигналов первой частоты.

Временной интервал, в котором мгновенное значение амплитуды принятого ультразвукового сигнала первой частоты превышает пороговый уровень, измеренный измерителем временного интервала 11 (ИВИ1), имел длительность:

t = 0,4 мкс.

Затем блок управления и индикации 1 (УПР) определил длительность корректирующего временного интервала в соответствии с выражением:

$$t_к = \left(\frac{T_1}{2} - t \right) / 2 = \left(\frac{1{,}67}{2} - 0{,}4 \right) / 2 = 0{,}21 мкс .$$

После этого блок управления 1 (УПР) определил временную координату начала принятого сигнала ультразвуковой волны первой частоты:

$$t_0 = \Delta t_1' - t_к = 333{,}69 - 0{,}21 = 333{,}48 мкс .$$

Используя эту временную координату, блок управления 1 (УПР) определил расстояние до отражателя h и передал данные в блок индикации 18 (И) для отображения.

$$h = c \cdot t_0 / 2 = 1500 \cdot 333{,}48 * 10^{-6} / 2 = 250{,}11 \ см ,$$

где c – скорость распространения ультразвука в воде.

Ошибка измерения уровня Δh составила:

$$\Delta h = 250 - 250{,}11 = 0{,}11 \text{ мм}.$$

3.2 Программный интерфейс дефектоскопа

Управление дефектоскопом производится от персонального компьютера через интерфейс связи. Данные с акустической решетки преобразуются в цифровой вид, сохраняются в ОЗУ микроконтроллера и передаются в ПК. Акустическая решетка закреплена неподвижно сверху над паллетой и при ее движении по конвейеру осуществляется сканирование. Полученные данные

формируются в пакет с помощью микроконтроллера, который пересылает этот пакет в персональный компьютер. Основная обработка данных акустической решетки производится в персональном компьютере. При этом вычисляется высота паллеты для первого ее положения. После этого паллета перемещается на один шаг, который варьируется от 10 до 100 мм в зависимости от требуемой точности и выполняемой задачи, по команде с ПК. Затем цикл съема и обработки данных с акустической решетки повторяется до окончания сканирования паллеты. Полный анализ и реконструкция поверхности паллеты осуществляется после окончания ее сканирования, при этом на экране монитора отображается псевдообъемное изображение поверхности паллеты и сообщение о годности или негодности паллеты. Дополнительно ПК вырабатывает сигнал для управления исполнительными механизмами, которые определяют траекторию движения паллеты. Неисправные паллеты направляются в ремонтную базу или утилизируются в зависимости от состояния. Управление обработкой и отображением результатов контроля, выбор параметров контроля осуществляется с помощью интерфейса оператора, который включает три окна: «График», «Данные» и «Служебный». Программная реализация выполнена на языке Delphi [110].

Окно «График» (рисунок 3.7) позволяет отобразить результаты в виде 3D реконструкции объекта контроля [111]. В этом же окне отображается текущий номер контролируемого поддона и если поддон не соответствует норме, то и результаты анализа на соответствие норме в виде надписи «НОРМА» или «БРАК». В случае непредвиденной остановки конвейера, перемещающего поддоны, предусмотрен счетчик времени, определяющий время перемещения поддона. При превышении установленного времени подается сообщение об аварийной ситуации. Индикаторы текущего и контрольного времени, размещены в правом верхнем углу окна «График».

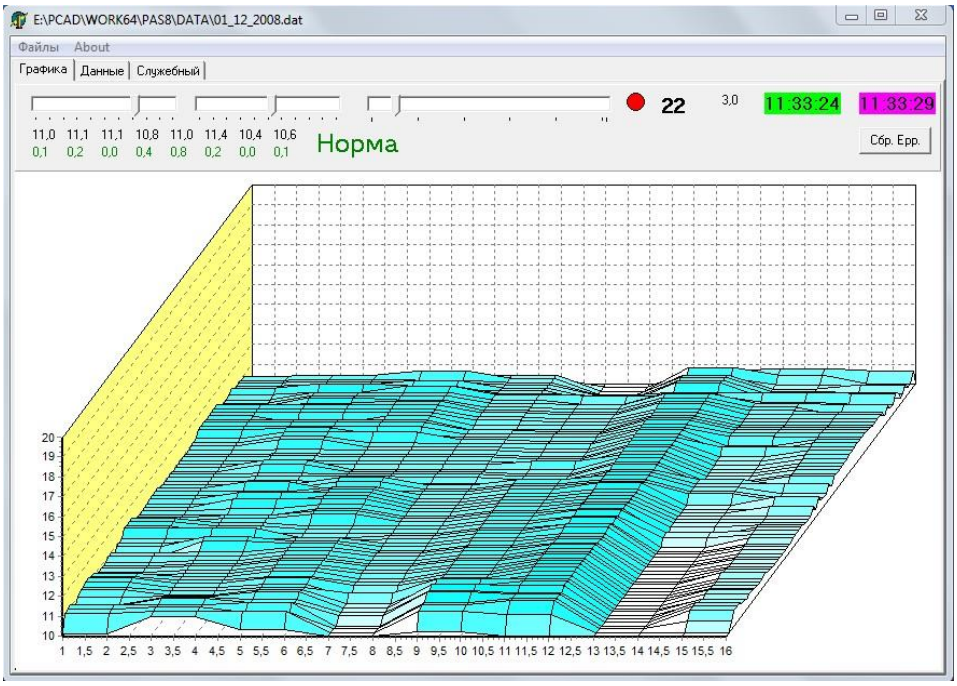


Рисунок 3.7 – Вид окна «График»

Основное окно программы имеет два поля. Верхнее поле содержит элементы настройки 3D графика и управление базой данных оцифрованных значений. Левый ползунок позволяет настроить угол обзора 3D рисунка, следующий ползунок настраивает перспективу. Правый ползунок служит для выбора поддона, отображаемого в графическом окне. В этом случае – 22 поддон. В правом углу верхнего поля выведены два индикатора времени. Левый индикатор отображает время начала сканирования паллеты (11:33:24). Правый индикатор отображает время окончания сканирования паллеты (11:33:29). Таким образом, время сканирования поверхности поддона составило 5 секунд. На рисунке представлено изображение поддона без дефектов. Ниже ползунков управления в левой части сгруппированы два ряда цифр, 8 групп. Верхний ряд средний уровень по датчику, нижний ряд - максимальное отклонение от среднего по поверхности.

Окно «Данные» (рисунок 3.8) состоит из 2-х частей, таблицы рассчитанных значений, и текстового окна с матрицей исходных данных.

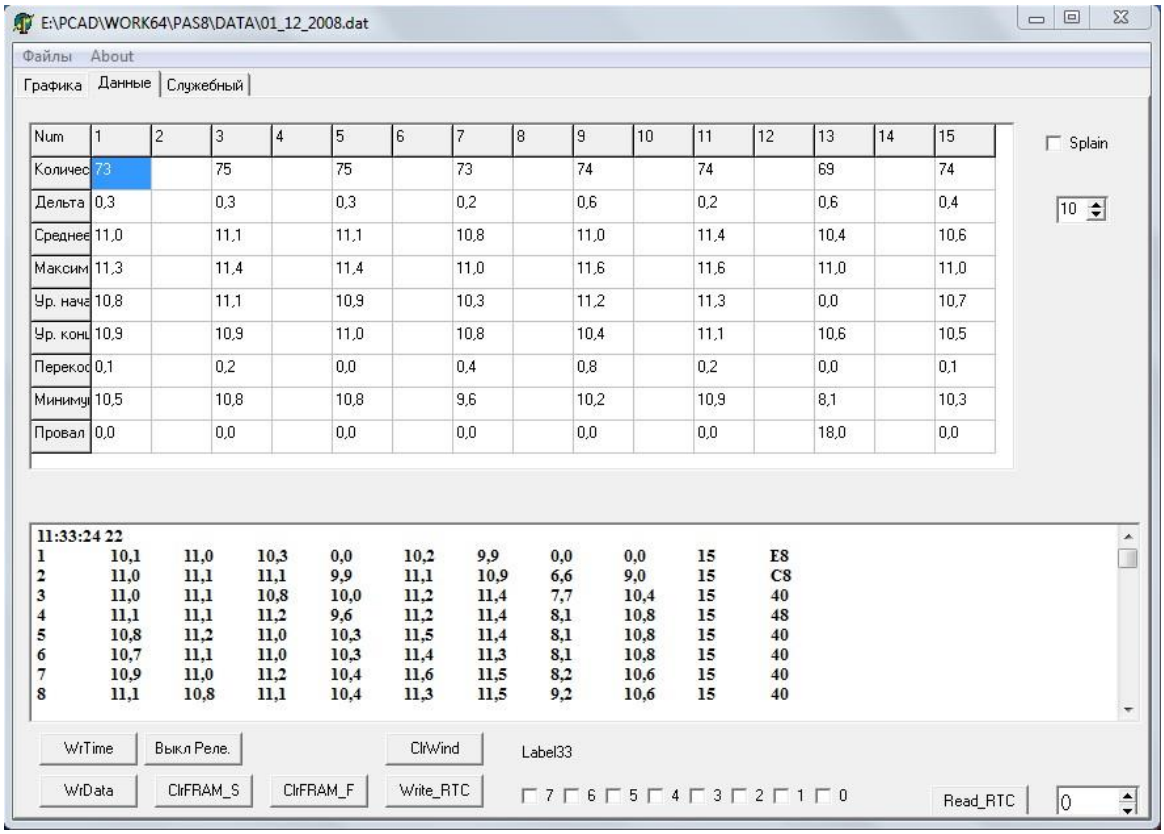


Рисунок 3.8 – Вид окна «Данные»

В первой строке верхней таблицы указывается количество достоверных данных с каждого из датчиков. Видно, что цифры разнятся, 73, 75, 74 и даже 69 отсчетов. Значения равные 0.0 означают, что ответ от отражающей поверхности поддона не получен. Это может быть в 2-х случаях, либо датчик расположен между досками поддона, либо имеется пролом доски. Рассчитывается среднее значение по каждому из столбцов данных, строка – «Среднее», затем ищутся максимальные значения по каждому из столбцов, строка «Максимум». Вычисляется разница между средним и максимальным значениями и заполняется строка «Дельта». Находится высота поддона в первый момент сканирования, это строка – «Ур.начала» и высота поддона в последний момент сканирования, это строка «Ур.конца». Определяется перекос по каждому из столбцов, это строка – «Перекос». Находится минимум по каждому из столбцов, это строка – «Минимум». Исходя из полученных данных, программа делает оценку целостности поддона и выдает заключение. Если полученные данные укладываются в допустимые границы, то отображается символ «Норма», если

полученные данные не укладываются в допустимые границы, такие как перекос поверхности поддона больше установленного значения, посторонние предметы на поддоне и т.д. то выводится сообщение «Брак» и сообщение о найденном отклонении, зажигается красная лампочка над конвейером транспортирующем поддон.

Анализируя уровень начала и уровень окончания оцифровки по каждому из каналов, определятся угол перекоса поверхности поддона, при выходе угла перекоса за критический угол, производится вывод сообщения «Брак» и найденное несоответствие.

Производится подсчет нулевых значений в каждом столбце данных, при нахождении более 5 идущих подряд нулевых значений, и при наличии в рядом расположенных столбцах нулевых значений выводится сообщение «Пролом доски».

Резкое локальное увеличение высоты поддона в одном из столбцов относительно всей поверхности поддона и относительно среднего по столбцу говорит о высокой вероятности нахождения на поверхности поддона посторонних предметов.

Окно «Служебный» (рисунок 3.9) служит для контроля работоспособности системы сортировки поддонов. В левом верхнем углу установлены индикаторы принимаемых и передаваемых пакетов данных. Слева внизу установлены индикаторы данных по 8 каналам, высота установки приемо-передающих элементов антенной решетки, уровень, допуски на геометрические размеры поддонов, текущую температуру и расчетную скорость распространения ультразвуковых колебаний. Это окно недоступно пользователю и используется только при настройке системы.

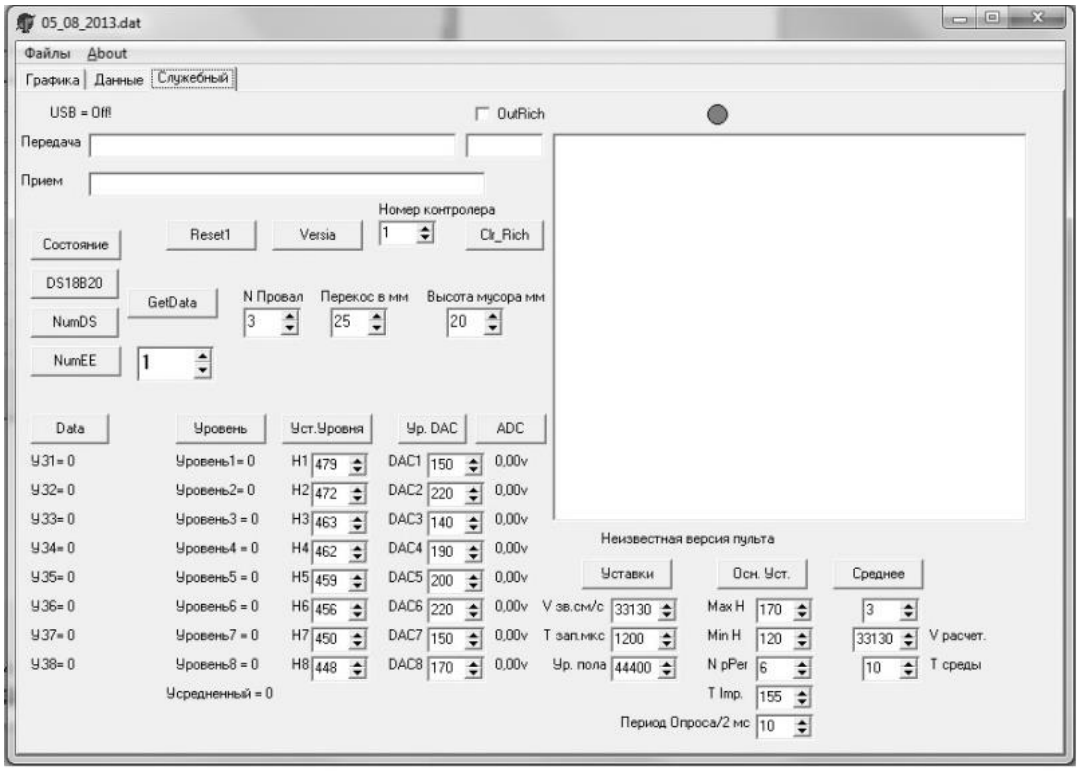


Рисунок 3.9 – Вид окна «Служебный»

Разработанная система имеет следующие технические характеристики:

- Количество каналов контроля – 8;
- Разрешающая способность – 0,5 мм;
- Контроль в реальном масштабе времени (при движении поддона по транспортеру);
- Диапазон установки величины допуска при контроле высоты поддона – ± 25 мм;
- Диапазон установки величины допуска на перекос высот поддона по его поверхности – ± 5 мм;
- Диапазон установки величины допуска на зазор между конструктивными элементами верхней плоскости поддона – 50 ± 5 мм.

Внешний вид блока электроники системы автоматической сортировки паллет показан на рисунке 3.10.



а б

Рисунок 3.10 – Блок электроники системы автоматической сортировки паллет (а), механизм подачи паллет с установленной паллетой (б)

3.3 Расчет концентратора

Для формирования необходимой зоны озвучивания объекта контроля одним излучателем воспользуемся рупорным концентратором. Рупор аналогичен трансформатору, который преобразует акустическую энергию с высоким давлением и низкой колебательной скоростью в области горла в энергию с низким давлением и высокой колебательной скоростью в области устья [112]. По аналогии с электрическим трансформатором, в котором электрическое напряжение и ток соответствуют акустическому давлению и скорости, основные требования акустического рупора таковы:

• горло должно быть правильно согласовано с источником сигнала;

• устье должно быть правильно согласовано с нагрузкой в виде объема воздуха;

• рупор должен функционировать в определенном диапазоне частот.

Рупор характеризуется четырьмя основными параметрами: площадь устья, площадь горла, характеристики профиля расширения и длина. Любые три из них определят четвертый, и, следовательно, непосредственно характеристики рупора. Теория передачи акустических волн в трубах изменяющегося сечения была изначально разработана лордом Рэлеем в своем классическом трактате «Теория

Звука» еще в 1878 году [113], но первые серьезные попытки определить практическую формулу были даны в работах [114] и других [115]. Зависимости акустического сопротивления в горле рупора от частоты для рупоров разных профилей бесконечной длины, но с одинаковым сечением горла были рассчитаны в работе [116]. Эти данные приведены на рисунке 3.11.

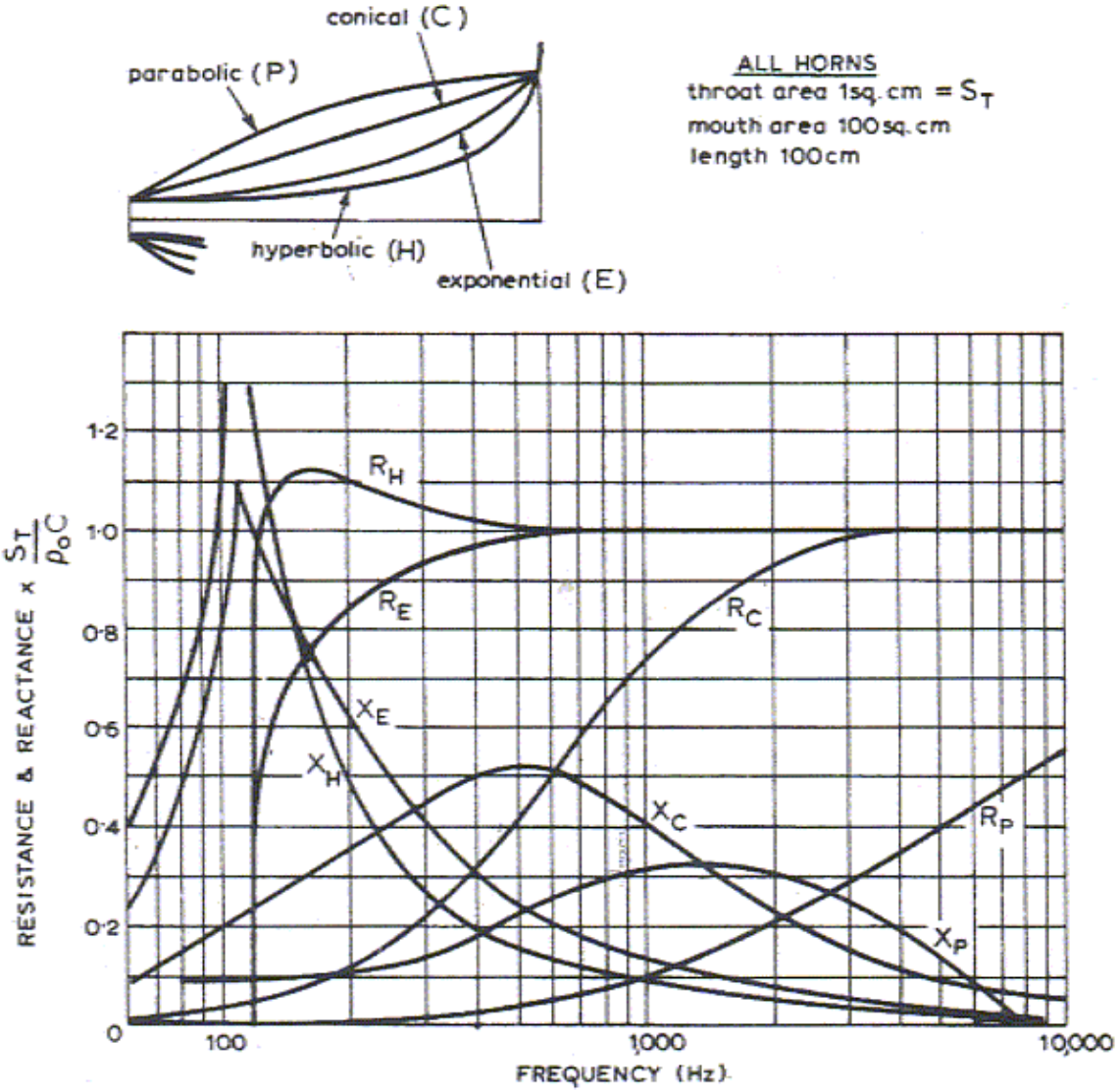


Рисунок 3.11 – Зависимости активных и реактивных акустических сопротивлений от частоты в горле рупоров разных контуров, имеющих бесконечную длину

Для оптимальной нагрузки излучателя комплексное сопротивление в горле рупора должно быть полностью активным в рабочем диапазоне частот. Из рисунка 3.11, можно установить, что наиболее близко удовлетворяют этому условию кривые экспоненциального и гиперболического профиля.

Следующее условие, которое должно быть удовлетворено это минимальные искажения в горле рупора, вызванные воздушной перегрузкой [117]. Когда звуковая волна излучается в воздухе, возникает ряд гармоник, искажающих форму волны. Это происходит, потому что, если равные положительные и отрицательные изменения давления действуют на некую массу воздуха, изменения объема не будут равными; изменение объема вследствие увеличения давления будет меньшим, чем из-за равного по величине уменьшения давления. Быстрые расширения и сжатия воздуха, вызванные распространением звуковых волн, происходят по адиабатическому закону, то есть отсутствует передача тепла. Таким образом, связь давления и объема описывается формулой:

$$pV^{\gamma} = const,$$

где p – давление, Па;

V – объем, м^3;

γ – постоянная адиабаты (приблизительно 1.4 для воздуха в нормальных условиях).

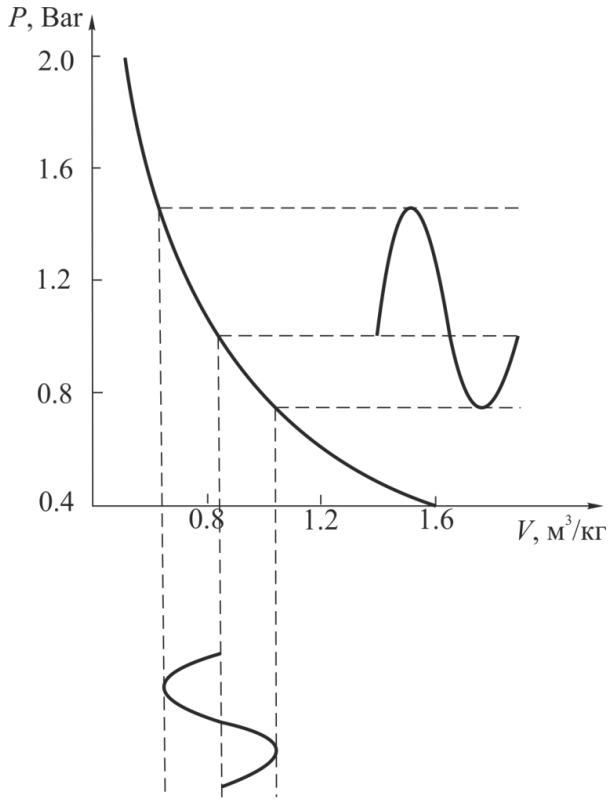


Рисунок 3.12 – Соотношение между давлением и объемом воздуха в случае адиабатического сжатия/расширения

В графическом виде механизм возникновения искажений проиллюстрирован на рисунке 3.12. При равных по модулю изменениях объема изменение давление оказывается разным, что и приводит к искажениям. Если бы рупор представлял собой цилиндрическую трубу, искажения увеличивались бы по мере распространения волны в сторону устья. Однако, в случае расширяющегося рупора по мере удаления от горла амплитуда давления волны уменьшается. Поэтому для минимальных искажений рупор должен расширяться резко, чтобы амплитуда давления волны уменьшалась как можно быстрее после того, как звуковая волна покинет горло. С этой точки зрения, очевидно, что параболические и конические контуры дают наименьшие искажения из-за воздушной перегрузки, в то время как гиперболический рупор, напротив, даст самые большие искажения, потому что для равного уменьшения давления звуковой волне потребуется преодолеть большее расстояние.

Кроме того, из рисунка 3.12 видно, что акустическое сопротивление экспоненциального рупора на частотах выше 2 кГц становится постоянной величиной, а реактивное сопротивление на частотах выше 10 кГц стремится к нулю.

Для определения площади устья рупора воспользуемся выражением, определяющим нижнюю частоту, при которой сопротивление имеет полностью реактивный характер:

$$f_н = \frac{m \cdot c}{4 \cdot \pi}, \tag{3.4}$$

где c – скорость звука, м^2/с;

m – постоянная расширения, которая фигурирует в основной формуле профиля экспоненциального рупора:

$$S_x = S_г \cdot e^{mx},$$

где S_x – площадь на расстоянии x от горла, м^2;

$S_г$ – площадь горла, м^2.

Постоянная расширения рассчитывается для выбранных частот среза, после чего строится профиль рупора с учетом наименьшей частоты, т.к. для большей частоты условие (3.4) будет выполнено автоматически. В рупорах, как и в цилиндрических трубах, чья длина превышает диаметр устья, наблюдается отражение в обратном направлении, в результате чего возникает интерференция с последующими волновыми фронтами. Также как и для горла рупора, для устья должно выполняться условие активного характера сопротивления среды в рабочем диапазоне частот. Для того, чтобы сопротивление излучения в устье носило активный характер, должно выполняться условие [116]:

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot R}{\lambda_н} > 1,$$

где R – радиус устья, м;

$\lambda_н$ – длина волны на самой низкой воспроизводимой частоте, м.

Следовательно:

$$S_y = \pi \cdot R^2 > \frac{\lambda_н^2}{4 \cdot \pi},$$

$$R > \frac{\lambda_н}{2 \cdot \pi},$$

где $\lambda_н$ – длина волны на частоте среза, м;

R – радиус устья, м;

S_y – площадь устья, м^2.

Источник излучения используем фирмы MURATA [118], который располагаем в горле рупорного концентратора.

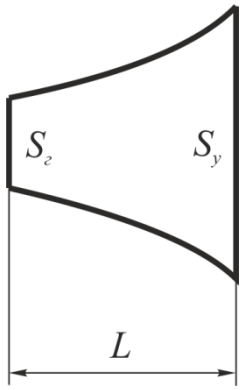


Рисунок 3.13 – Схема рупорного концентратора

Устье рупорного концентратора будет являться вторичным источником излучения и его можно считать новым датчиком. Его ближнюю зону находим как:

$$H_0 = \frac{D^2}{4 \cdot \lambda}, \qquad (3.5)$$

где H_0 – расстояние до границы ближней и дальней зон, м;

λ - длина волны, м;

D – диаметр излучателя, м.

Угол расхождения круглого излучателя диаметром D определяется из выражения [119, 120]:

$$a = \arcsin\left(\frac{\lambda}{D}\right), \tag{3.6}$$

где a – угол расхождения;

λ - длина волны, м;

D – диаметр излучателя, м.

Отсюда находим размер раскрыва концентратора, который в нашем случае является диаметром устья концентратора:

$$d = \frac{\lambda}{\sin a}. \tag{3.7}$$

С учетом угла расхождения, диаметра раскрыва концентратора и величины дальней зоны (зоны Фраунгофера), находим диаметр озвучиваемого пятна на поверхности паллеты:

$$L = H_{\partial} \cdot tg(a) = H_{\partial} \cdot tg\left(\arcsin\left[\frac{1.22 \cdot \lambda}{D}\right]\right), \tag{3.8}$$

где H_{∂} – величина дальней зоны;

a – угол расхождения;

λ – длина волны, м;

D – диаметр излучателя, м.

Результаты расчета диаметра озвучиваемого пятна на поверхности паллеты для двух значений дальней зоны 0,25 и 0,3 м, выполненные в соответствии с выражением (3.8), представлены на рисунке 3.14.

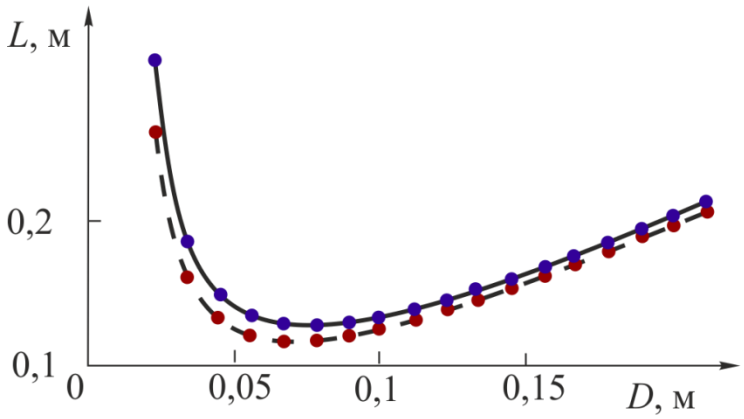


Рисунок 3.14 – Зависимость диаметра пятна озвучивания L от диаметра раскрыва концентратора D , для двух значений дальней зоны, а –0,25 м, б – 0,3 м

Требуемый размер пятна (0,12 м) обеспечивается при раскрыве концентратора от 0,05 до 0,08 м. С учетом величины ближней зоны (выражение 3.5), в пределах которой не происходит расхождение ультразвуковой волны, высоту установки датчика можно найти как:

$$H = H_д + H_0, \tag{3.9}$$

где H_0 – величина ближней зоны;

λ - длина волны, м;

D – диаметр излучателя, м;

$H_д$ - величина дальней зоны.

Результаты расчета высоты установки датчика, выполненные в соответствии с выражением (3.9), представлены на рисунок 3.15. При этом величина дальней зоны выбрана 0,25 м [121].

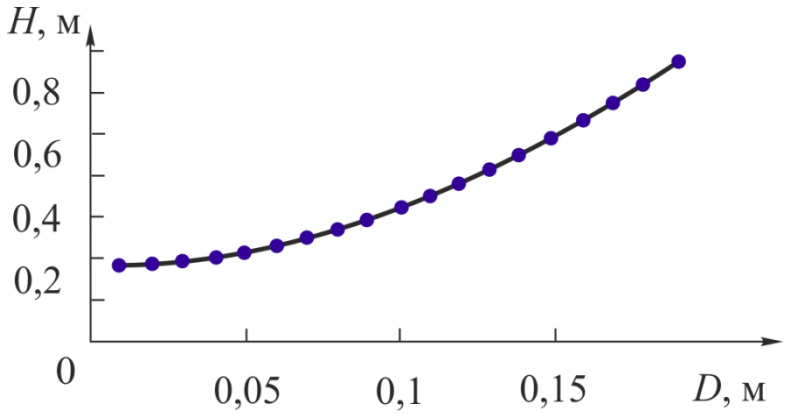


Рисунок 3.15 – Зависимость высоты установки датчика от диаметра раскрыва концентратора

При необходимом диаметре раскрыва концентратора от 0,05 до 0,08 м, для обеспечения требуемой зоны озвучивания в 0,12 м, получаем высоту установки антенной решетки от 0,29 до 0,36 м.

Длина рупорного концентратора $L_к$ зависит от площадей устья и горла:

$$L_k = \frac{c}{4 \cdot \pi \cdot f} \ln\left(\frac{S_{устья}}{S_{горла}}\right), \tag{3.10}$$

где c – скорость упругой волны, м/с;

f – частота излучения, Гц;

$S_{устья}$ – площадь устья концентратора, м^2;

$S_{горла}$ – площадь горла концентратора, м^2.

Результаты расчета длины рупора для различных соотношений площадей устья и горла [122], выполненные по выражению (3.10) для двух частот 25 кГц и 40 кГц, приведены на рисунок 3.16.

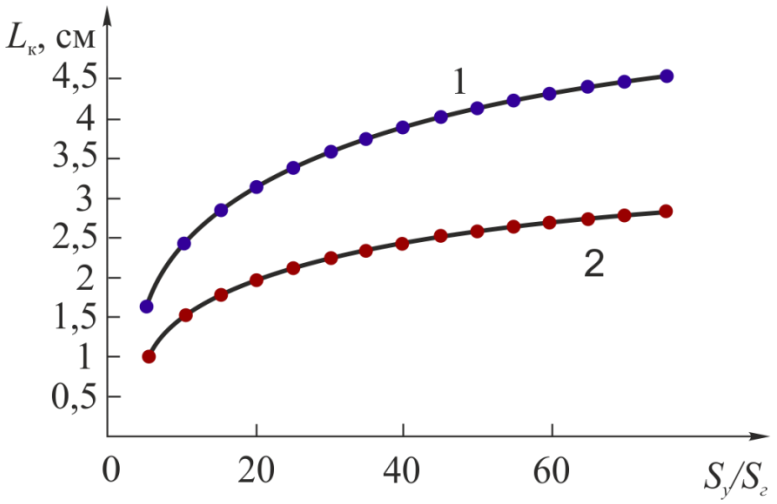


Рисунок 3.16 – Зависимость длины рупора от соотношения площадей устья и горла для частот 1- 25 кГц, 2 – 40 кГц

Как видно из рисунок 3.16 при длине рупора 5 см соотношение площадей не должно превышать 100 для обоих частот излучения, что всегда выполняется при использовании стандартных датчиков фирмы MURATA [123, 124].

3.4 Алгоритм реконструкции поверхности паллеты

Алгоритм реконструкции поверхности паллет основан на обработке полученных данных от акустической решетки. С помощью каждого А-скана вычисляется расстояние до отражающей поверхности паллеты в 15 точках поперек паллеты и от 12 до 120 точек (в зависимости от выбранного шага сканирования) вдоль паллеты [92]. Сканирование вдоль паллеты осуществляется путем ее передвижения по конвейеру, при этом акустическая решетка остается неподвижной. Пятна отражения перекрывают друг друга, позволяя контролировать промежутки между датчиками. На рисунке 3.17 представлено схематическое изображение паллеты. Зона отражения для каждой пары датчиков показана в виде круга. Оранжевые круги соответствуют зонам для одноименной пары излучатель – приемник, белый для рядом расположенного приемника. Это добавляет точки контроля, без увеличения пар датчик – излучатель. Зона отражения для каждой пары излучатель-приемник составляет круг диаметром 100

мм. Набор из 15 зон соответствует суммарной зоне 1500 мм. Поперечный размер паллеты составляет 800 мм, следовательно, решетка из 8 элементов обеспечивает контроль паллеты и каждая зона пары излучатель-приемник перекрывает зону соседней пары, исключай тем самым появление возможных неконтролируемых зон на поверхности паллеты.



Рисунок 3.17 – Область сканирования поддона ультразвуковыми датчиками

Дистанция до паллеты вычисляется в соответствии с выражением [125]:

$$h = \frac{t \cdot v}{2}, \tag{3.11}$$

где h – вычисленное расстояние до поверхности паллеты, м;

t – время распространения акустической волны от датчика до паллеты и обратно, с;

v – скорость распространения акустической волны в среде, м^2/с.

Скорость распространения упругих колебаний в воздушной среде зависит от ее параметров: влажности, давления, температуры и т.п., а для расчета

дистанции необходимо ее знать, то вначале производят измерение скорости распространения упругих колебаний в воздушной среде. Эта процедура осуществляется в каждом акустическом канале в отсутствии паллеты на конвейере. При этом измеряют время распространения упругих колебание до конвейерной ленты и рассчитывают скорость:

$$v = \frac{2h_{полн}}{t}, \tag{3.12}$$

где $h_{полн}$ – расстояние от акустической решетки до конвейерной ленты, м.

Рассчитанную скорость по формуле (3.12) используют для определения расстояния до паллеты по формуле (3.11). По найденному расстоянию до паллеты вычисляем ее высоту:

$$h_п = h_{полн} - h \tag{3.13}$$

где $h_п$ – высота паллеты, м;

h – расстояние от акустической решетки до паллеты, м.

Повышение точности в определении времени распространения акустической волны обеспечивает оригинальный алгоритм, описанный в [40], на который получен патент РФ № 2596907 [126 – 129]. Расчетная высота паллеты во всех точках контроля сравнивается с эталонным значением. При выходе расчетного значения за допустимые пределы вырабатывается сигнал «БРАК» при этом поддон бракуется. По полученным данным о высоте паллеты осуществляется графическая реконструкция поверхности поддона для визуального контроля его параметров на экране монитора [130].

В качестве эксперимента был произведен контроль нескольких деревянных поддонов. Измерения производятся параллельно в 15 точках поперек и от 12 до 75 вдоль поддона за счет передвижения паллет по конвейеру. На рисунке 3.18 показана фотография паллет с отсутствием повреждений.



Рисунок 3.18 – Фотография поддона без наличия повреждений

Измерения производились с шагом 16 мм. Результаты измерений системы контроля паллет представлены в таблице 3.1. Единицы измерений числовых данных в таблице 3.1 – сантиметры.

Таблица 3.1 – Данные измерений с 16-ти датчиков

№	Номер датчика															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	13,6	13,6	14,7	14,7	14,7	14,7	12,6	12,6	13,1	13,1	12,2	12,2	13,9	13,9	13,3	13,3
2	14,3	14,3	14,6	14,6	14,6	14,6	13,4	13,4	13,9	13,9	13,1	13,1	14	14	13,7	13,7
3	14,3	14,3	14,5	14,5	14,5	14,5	13,7	13,7	13,9	13,9	13,5	13,5	14	14	13,7	13,7
4	14,8	14,8	14,3	14,3	14,6	14,6	13,3	13,3	13,9	13,9	13,5	13,5	14	14	13,4	13,4
5	14,3	14,3	14,2	14,2	14,5	14,5	13,7	13,7	13,9	13,9	13,1	13,11	14	14	13,4	13,4
6	14,6	14,6	14,4	14,4	14,4	14,4	13,6	13,6	13,8	13,8	13,1	13,1	14	14	13,4	13,4
7	14,5	14,5	14,4	14,4	14,3	14,3	13,6	13,6	13,8	13,8	13	13	13,9	13,9	13,3	13,3
8	14,4	14,4	14	14	14,3	14,3	13,5	13,5	13,8	13,8	13	13	13,9	13,9	13,6	13,6
9	14,4	14,4	14	14	14,3	14,3	13,5	13,5	13,7	13,7	13	13	13,8	13,8	13,7	13,7
10	14,4	14,4	14,3	14,3	14,3	14,3	13,5	13,5	13,7	13,7	13,3	13,3	13,8	13,8	13,7	13,7
11	14,3	14,3	14,2	14,2	14,2	14,2	13,4	13,4	13,7	13,7	12,9	12,9	13,8	13,8	13,7	13,7
12	14,3	14,3	13,9	13,9	14,2	14,2	13,4	13,4	13,7	13,7	12,9	12,9	13,7	13,7	14	14
13	14,3	14,3	13,9	13,9	14,2	14,2	13,4	13,4	13,7	13,7	12,9	12,9	13,7	13,7	13,6	13,6
14	14,3	14,3	14	14	14,2	14,2	13,4	13,4	13,7	13,7	12,9	12,9	13,7	13,7	13,6	13,6

Продолжение таблицы 3.1 – Данные измерений с 8-ми датчиков

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
15	14,3	14,3	14,2	14,2	14,2	14,2	13,4	13,4	13,7	13,7	13,2	13,2	13,7	13,7	13,6	13,6
16	14,3	14,3	13,9	13,9	14,2	14,2	13,4	13,4	13,7	13,7	13,2	13,2	13,7	13,7	13,7	13,7
17	14,4	14,4	14	14	14,3	14,3	13,4	13,4	13,7	13,7	13,3	13,3	13,7	13,7	13,2	13,2
18	14,4	14,4	14	14	14,2	14,2	13,4	13,4	13,7	13,7	13,2	13,2	13,7	13,7	13,2	13,2
19	14,4	14,4	14	14	14,2	14,2	13,4	13,4	13,7	13,7	13,2	13,2	13,7	13,7	13,6	13,6
20	14,3	14,3	14	14	14,2	14,2	13,4	13,4	13,6	13,6	13,2	13,2	13,7	13,7	13,6	13,6
21	14,3	14,3	13,9	13,9	14,2	14,2	13,3	13,3	13,6	13,6	12,9	12,9	13,6	13,6	13,2	13,2
22	14,4	14,4	14	14	14,2	14,2	13,3	13,3	13,6	13,6	12,9	12,9	13,6	13,6	13,2	13,2
23	14,4	14,4	14	14	14,1	14,1	13,3	13,3	13,6	13,6	13,3	13,3	13,7	13,7	13,2	13,2
24	14,4	14,4	14	14	14,2	14,2	13,3	13,3	13,6	13,6	13,2	13,2	13,3	13,3	12,8	12,8
25	14,4	14,4	14	14	14,1	14,1	13,3	13,3	13,6	13,6	13,3	13,3	13,3	13,3	12,8	12,8
26	14,4	14,4	14	14	14,1	14,1	13,3	13,3	13,7	13,7	13,3	13,3	12,1	12,1	12,8	12,8
27	14,4	14,4	14,1	14,1	14,1	14,1	13,3	13,3	13,7	13,7	13,3	13,3	12,1	12,1	12,8	12,8
28	14,4	14,4	14,1	14,1	14,1	14,1	13,3	13,3	13,7	13,7	13,3	13,3	12,5	12,5	12,8	12,8
29	14,4	14,4	14,1	14,1	14,1	14,1	13,3	13,3	13,7	13,7	13,3	13,3	12,5	12,5	12,8	12,8
30	14,4	14,4	14,1	14,1	14,1	14,1	13,3	13,3	13,7	13,7	13,3	13,3	12,5	12,5	12,8	12,8
31	14,4	14,4	14,1	14,1	14,1	14,1	13,3	13,3	13,7	13,7	13,3	13,3	12,2	12,2	12,8	12,8
32	14,5	14,5	14	14	14,1	14,1	13,3	13,3	13,7	13,7	13,3	13,3	11,8	11,8	12,8	12,8
33	14,4	14,4	14,4	14,4	14,1	14,1	13,3	13,3	13,7	13,7	13,3	13,3	12,5	12,5	12,8	12,8
34	14,4	14,4	14	14	14,1	14,1	13,3	13,3	13,6	13,6	13,3	13,3	12,6	12,6	12,8	12,8
35	14,5	14,5	14	14	14,1	14,1	13,3	13,3	13,6	13,6	13,3	13,3	12,2	12,2	12,8	12,8
36	14,4	14,4	13,9	13,9	14,1	14,1	13,3	13,3	13,7	13,7	13,3	13,3	12,2	12,2	12,8	12,8
37	14,4	14,4	13,9	13,9	14,1	14,1	13,3	13,3	13,6	13,6	13,3	13,3	12,2	12,2	12,9	12,9
38	14,4	14,4	13,9	13,9	14,1	14,1	13,3	13,3	13,6	13,6	13,3	13,3	12,2	12,2	12,3	12,3
39	14,4	14,4	13,8	13,8	14,1	14,1	13,3	13,3	13,7	13,7	12,9	12,9	12,2	12,2	12,3	12,3
40	14,3	14,3	13,8	13,8	14	14	13,3	13,3	13,3	13,3	12,9	12,9	12,2	12,2	12,5	12,5
41	14,3	14,3	13,8	13,8	14	14	13,3	13,3	13,2	13,2	12,9	12,9	12,2	12,2	12,9	12,9
42	14,3	14,3	13,8	13,8	14	14	13,3	13,3	13,6	13,6	13,3	13,3	12,2	12,2	12,5	12,5
43	14,3	14,3	13,8	13,8	14	14	13,3	13,3	13,6	13,6	12,9	12,9	12,2	12,2	12,4	12,4
44	14,3	14,3	13,8	13,8	13,9	13,9	13,3	13,3	13,6	13,6	13,3	13,3	12,2	12,2	12,8	12,8
45	14,2	14,2	13,8	13,8	13,6	13,6	13,3	13,3	13,3	13,3	13,2	13,2	12,8	12,8	12,3	12,3
46	13,9	13,9	13,9	13,9	14	14	13,3	13,3	13,7	13,7	12,9	12,9	12,4	12,4	11,6	11,6
47	13,8	13,8	13,8	13,8	14	14	13,3	13,3	13,7	13,7	13,3	13,3	12,4	12,4	11,6	11,6
48	13,8	13,8	13,9	13,9	14	14	13,3	13,3	13,6	13,6	13,3	13,3	12,8	12,8	11,6	11,6
49	13,8	13,8	13,9	13,9	14	14	13,3	13,3	13,7	13,7	12,9	12,9	12,8	12,8	11,6	11,6
50	13,8	13,8	13,9	13,9	14	14	13,3	13,3	13,7	13,7	13,3	13,3	12,4	12,4	11,2	11,2
51	13,9	13,9	13,9	13,9	14	14	13,4	13,4	13,7	13,7	13,4	13,4	11,2	11,2	12,1	12,1
52	13,9	13,9	13,9	13,9	14	14	13,4	13,4	13,7	13,7	13,4	13,4	11,7	11,7	12,1	12,1
53	13,9	13,9	13,9	13,9	14	14	13,4	13,4	13,7	13,7	13,4	13,4	12,6	12,6	11,7	11,7
54	14,2	14,2	13,9	13,9	14	14	13,4	13,4	13,7	13,7	13,4	13,4	13	13	12,6	12,6
55	13,9	13,9	14	14	14	14	13,4	13,4	13,7	13,7	13,1	13,1	12,6	12,6	13	13
56	14,3	14,3	14	14	14	14	13,4	13,4	13,8	13,8	13,1	13,1	13	13	12,5	12,5
57	14,3	14,3	14,1	14,1	14,1	14,1	13,5	13,5	13,8	13,8	13,5	13,5	12,6	12,6	12,5	12,5

Продолжение таблицы 3.1 – Данные измерений с 8-ми датчиков

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
58	14,2	14,2	14	14	14,1	14,1	13,5	13,5	13,8	13,8	13,2	13,2	13	13	12,5	12,5
59	14,2	14,2	14	14	14	14	13,5	13,5	13,8	13,8	13,2	13,2	13	13	12,5	12,5
60	14,2	14,2	14	14	14,1	14,1	13,5	13,5	13,8	13,8	13,6	13,6	13	13	12,1	12,1
61	14,2	14,2	14	14	14,1	14,1	13,6	13,6	13,9	13,9	13,6	13,6	13,1	13,1	12,1	12,1
62	14,2	14,2	13,9	13,9	14,1	14,1	13,6	13,6	13,9	13,9	13,7	13,7	13,1	13,1	12,6	12,6
63	14,2	14,2	13,9	13,9	14,1	14,1	13,6	13,6	13,9	13,9	13,7	13,7	13,1	13,1	12,6	12,6
64	14,1	14,1	13,5	13,5	14,1	14,1	13,6	13,6	14	14	13,8	13,8	12,7	12,7	13,1	13,1
65	14,2	14,2	14	14	14,2	14,2	13,6	13,6	14	14	13,8	13,8	13,3	13,3	13,1	13,1
66	14,2	14,2	13,9	13,9	14,2	14,2	13,6	13,6	13,9	13,9	13,8	13,8	12,8	12,8	13,2	13,2
67	14,2	14,2	13,6	13,6	14,2	14,2	13,6	13,6	14	14	13,8	13,8	13,2	13,2	13,2	13,2
68	14,2	14,2	14	14	14,2	14,2	13,7	13,7	13,6	13,6	13,8	13,8	13,2	13,2	13,1	13,1
69	13,9	13,9	13,7	13,7	14,3	14,3	13,7	13,7	13,7	13,7	13,4	13,4	13,7	13,7	12,8	12,8
70	13,9	13,9	14	14	14,3	14,3	13,7	13,7	14,1	14,1	13,9	13,9	13,4	13,4	12,9	12,9
71	13,9	13,9	13,7	13,7	14,3	14,3	13,7	13,7	13,7	13,7	13,9	13,9	13,8	13,8	13,2	13,2
72	13,9	13,9	13,2	13,2	14,3	14,3	13,7	13,7	13,8	13,8	13,8	13,8	13,4	13,4	12,9	12,9
73	13,5	13,5	13,2	13,2	13,9	13,9	13,8	13,8	13,8	13,8	13,6	13,6	13,9	13,9	13,3	13,3
74	13,5	13,5	13,2	13,2	13,3	13,3	13,3	13,3	12,9	12,9	13,1	13,1	13,9	13,9	12,5	12,5
75	13,5	13,5	13,2	13,2	12,4	12,4	13,3	13,3	12,9	12,9	13,1	13,1	12,7	12,7	12,5	12,5

Затем из этого массива значений был построен график поверхности контролируемого паллет, он представлен на рисунке 3.19.

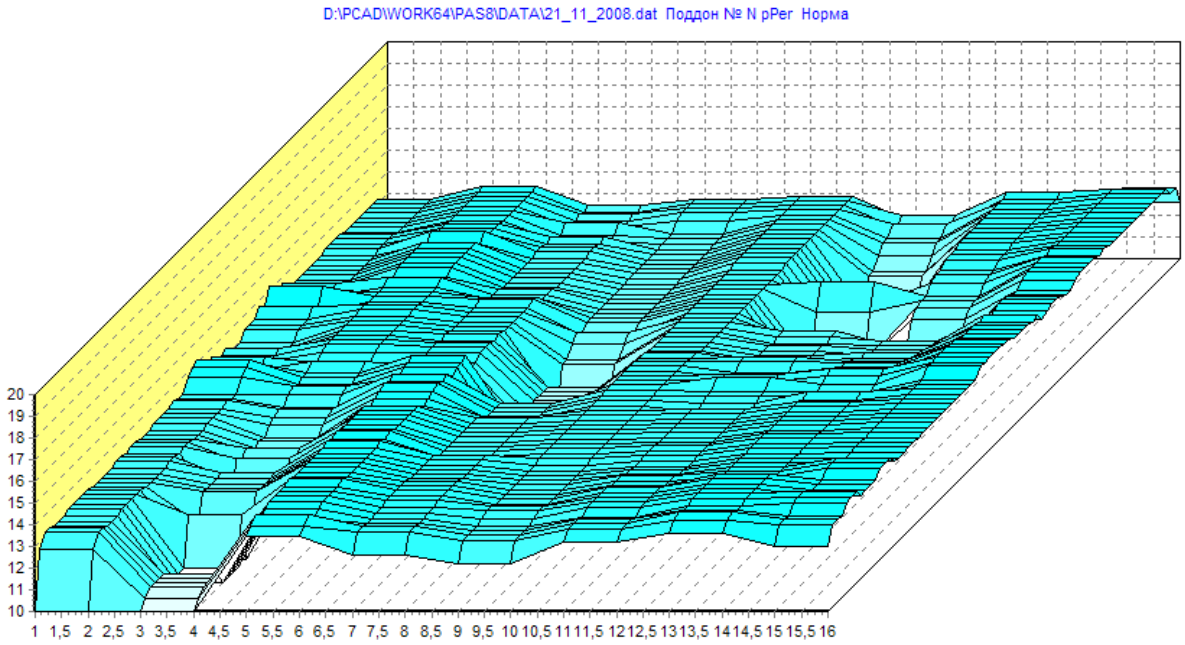


Рисунок 3.19 – График поверхности контролируемой паллеты без дефектов

После контроля целого паллет был произведен контроль паллеты с посторонним предметом в виде бруска, попавшим от сломанной паллеты при их складировании стопкой и выломанной верхней доской, фотография которого изображена на рисунке 3.20.



Рисунок 3.20 – Фотография поддона с посторонним предметом в виде бруска и выломанной верхней доской

Система обнаружила оба типа дефектов и поддон был забракован. Результат контроля изображен в виде графика поверхности на рисунке 3.21.

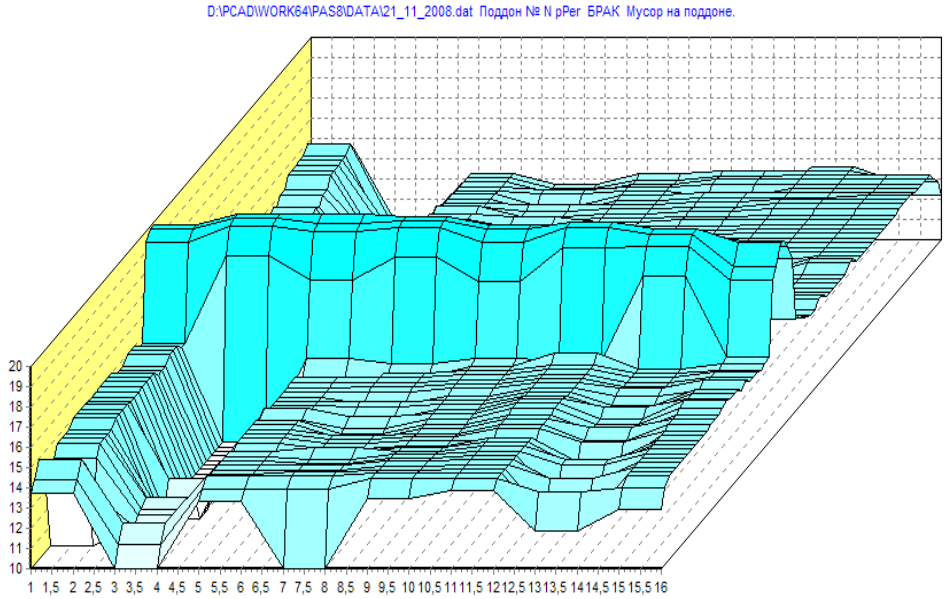


Рисунок 3.21 – График поверхности контролируемого паллет с посторонним предметом в виде бруска и выломанной верхней доской

Из рисунка 3.21 видно, что посторонний предмет на поверхности паллеты уверенно различим. Кроме того выявилось слишком большое расстояние между двумя соседними конструктивными элементами паллеты.

Затем был проведен контроль еще одного поддона с нарушением целостности верхней поверхности (отсутствует один элемент) фотографию которого можно увидеть на рисунке 3.22.



Рисунок 3.22 – Фотография поддона с нарушением целостности верхней поверхности

На рисунке 3.23 видно, что на поверхность паллеты повреждена и на ней отсутствует один элемент. В результате вырабатывается сигнал «БРАК», который индицируется в строке сообщений, расположенной выше изображения паллеты. В дополнении к этому надпись содержит информацию о номере паллеты и файле, в котором эти данные сохраняются.

Время контроля одного поддона зависит от того с каким шагом будут проводиться измерения, в среднем оно не превышает 10 сек, соответственно за час система контроля паллет способна проверить не менее 360 поддонов.

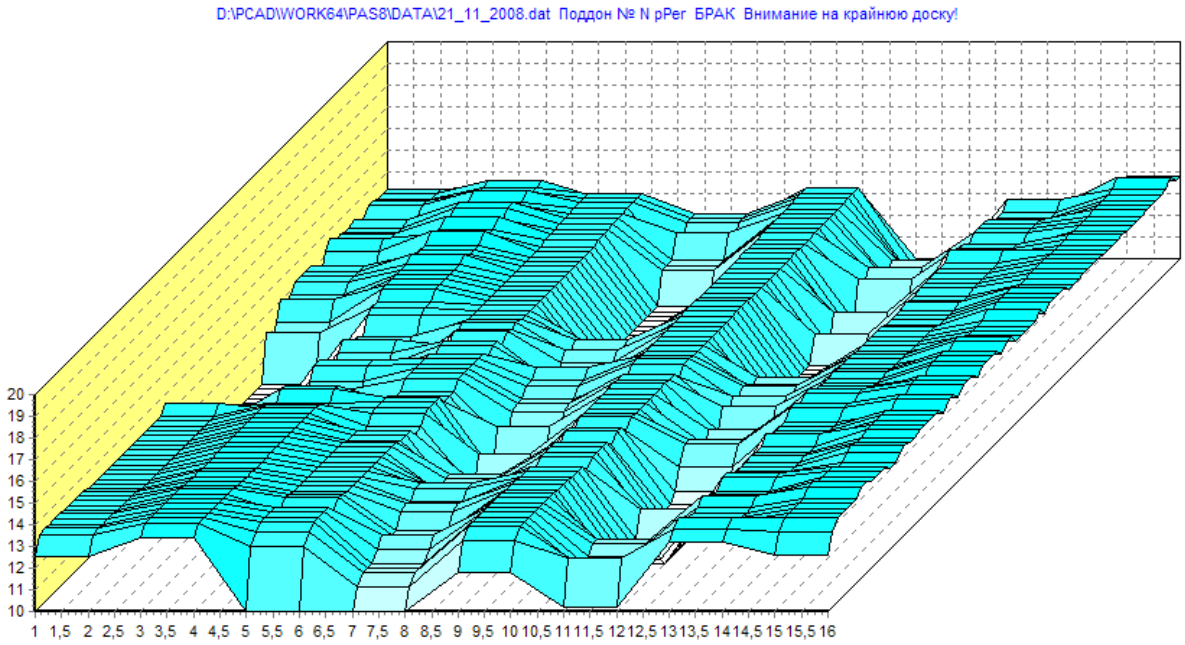


Рисунок 3.23 – График поверхности контролируемой паллеты с нарушением целостности верхней поверхности

На рисунке 3.24 приведены результаты обнаружения снега и льда на поверхности паллеты.

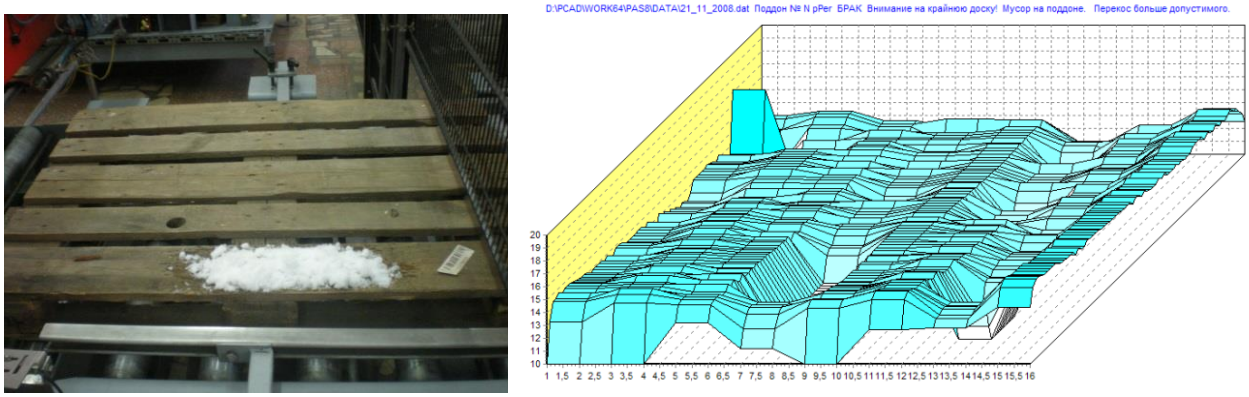


Рисунок 3.24 – Результаты экспериментальных исследований паллет с дефектом в виде снега, (а) – фотография, (б) – реконструкция поверхности паллеты

После определения геометрических параметров поддонов и их технического состояния, вырабатывается либо сигнал на удаление поддона с конвейера, если он

неисправен или не соответствует ГОСТу, либо на дальнейшее движение паллеты по конвейеру на участок загрузки готовой продукции.

За счет использования таких систем контроля технического состояния и геометрических размеров паллет уменьшаются простои производства и число обслуживающего персонала на этой операции. Такие системы могут быть легко встроены в любую линию сортировки паллет.

Выводы

Практическое подтверждение результатов теоретических исследований нашло в разработанном программно-аппаратном комплексе для контроля геометрических параметров паллет с визуализацией результатов на экране монитора в виде псевдообъемного изображения объекта контроля. Для реализации способа двухчастотного зондирования с фазовой коррекцией были предложены и исследованы структурные схемы блоков обработки эхо-сигналов, новизна которых подтверждена патентами РФ. В качестве примеров приведены фотографии и результаты реконструкции поверхности паллет с характерными дефектами, подтверждающие высокие технические характеристики программно-аппаратного комплекса.

Заключение

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 срабатывании порогового устройства и последующей корректировки временной координаты срабатывания порогового устройства, который позволил получить погрешность контроля менее 0,5%.

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.

На основе созданной модели были исследованы метрологические характеристики дефектоскопа в широком диапазоне изменения частот зондирования и их соотношения. Показано, что для получения минимальной погрешности контроля следует выбирать соотношение частот зондирования не более 1,3. Однако при использовании алгоритма определения номеров периодов срабатывании порогового устройства это ограничение становится несущественным.

Важным моментом диссертационной работы является исследование влияния параметров эхо-импульсов на результат контроля. Выявлено, что для

получения минимальной погрешности контроля необходимо обеспечить одинаковую амплитуду и форму огибающей переднего фронта эхо-сигналов.

По результатам проведенных исследований был разработан программно-аппаратный комплекс для контроля геометрических параметров паллет. Использование двухчастотного способа зондирования с фазовой коррекцией позволило получить погрешность контроля не более 1 мм. Для обеспечения таких характеристик во всем диапазоне рабочих температур был применен опорный канал для расчета текущей скорости распространения упругой волны после контроля каждой паллеты в момент ее отсутствия на конвейере. Использование антенной решетки в системе контроля позволило применить сканирование только по одной координате и обеспечить тем самым высокую производительность контроля.

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.

Список использованных источников

1. Kostina, M.A. Influence of the echo shapes on the result of tomographic image [Electronic resources]/ M.A. Kostina, P.V. Sorokin , A.A. Soldatov, U.V. Shulgina , A.A. Abouellail // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). : IEEE, 2015. – [P. 1–4].

2. ГОСТ 9557-87 Поддон плоский деревянный размером 800х1200 мм. Технические условия (с Изменением N 1). – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 6 с.

3. ГОСТ 9078-84 Поддоны плоские. Общие технические условия (с Изменением N 1). – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 10 с.

4. UIC 435-2 Standard of quality for a European flat wood pallet, with four entries and measuring 800 mm x 1 200 mm. – 2005. – 56 с.

5. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 27 с.

6. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 1: В 2 кн. Кн. 1 – М.: Машиностроение, 2003 – 656 с.

7. Иванов В.И., Власов И.Э Современные требования к методам и средствам неразрушающего контроля //Тезисы докладов 7-й Международной конференции “Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности” – М., 2008. – С. 129.

8. Федосов А.В. Гайнуллина Л.А. Методы неразрушающего контроля // Электротехнические и информационные комплексные системы. - № 2, Т.11, - 2015. С. 73-78.

9. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. Кн. 1 – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.

10. Алешин Н.П. Современное оборудование и технологии неразрушающего контроля ПКМ / Н.П. Алешин, М. В. Григорьев, Н. А. Щипаков // Инженерный вестник – 2015 –№1 – С. 533 - 538.

11. Белов, А.А. Современные методы диагностики объектов из композиционных материалов/ А.А. Белов, Ю.Д. Иванов, А.А. Шестаков, С.Г. Царева, Н.С. Черницов// Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук – М.: Научно-информационный издательский центр и редакция журнала "Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук", 2015 – С. 56-59.

12. Калиниченко Н.П. Визуальный и измерительный контроль : учебное пособие для подготовки специалистов I, II и III уровня. / Н.П. Калиниченко, А.Н. Калиниченко. –Томск : Изд-во ТПУ, 2009. – 299 с.

13. Инструкция по визуальному и измерительному контролю. РД 03-606-03. – М.:ДЕАН, 2010. – 312 с.

14. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под ред. В.В. Клюева, т.3: Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение,2003. – 864 с.

15. Козлов В.Н. Акустическая В- и С-томография крупноструктурных материалов импульсным эхометодом / В.Н. Козлов, А.А. Самокрутов, Н.Н. Яковлев, А.В. Ковалев, В.Г. Шевалдыкин // Приборы и системы управления – 1989. – №7. – с. 21-23

16. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Том 3: Ультразвуковой контроль. / Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с: ил.

17. ГОСТ 23829-85 Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения

18. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: Изд-во Спектр, 2009. – 544 с: ил.

19. Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Тепловой контроль и диагностика: учебное пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 104 с.

20. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под ред. В.В. Клюева, т.1, Кн. 2: Радиационный контроль. – М.: Машиностроение,2003. – 560 с.

21. Ларин, А.А. Преимущества и недостатки существующих методов НК: диссертация на соискание ученой степени к.т.н. "Способы оценки работоспособности изделий из композиционных материалов методом компьютерной томографии" – М, 2013. – 45 с.

22. Introduction to phased array ultrasonic technology applications: R/D Tech Guideline: Guideline coordinator Noel Dube. – Quebec, Canada: R/D Tech Inc., 2004, – 348 p.

23. Thomenius, K. Evolution of Ultrasound Beamformers // IEEE Ultrasonics Symposium, 1996; 2, 1615-1622

24. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: Справочник / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер; Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.

25. Системы наполнения, упаковки и обработки – [Электронный ресурс] / Автоматическая система контроля и контроля качества поддонов OCME – Режим доступа: http://www.ocme.co.uk/pallet_inspection.htm – Заглавие с экрана. – яз. англ. (Дата обращения 11.12.2017)

26. The world of conveyor technology – [Электронный ресурс] / Automatic pallet inspection station – Режим доступа: http://www.wtt-foerdertechnik.de/produkte_en/automatic-conveyors-for-pallets-automatic-pallet-inspection-station.php – Заглавие с экрана. – яз. англ. (Дата обращения 15.12.2017)

27. Industry search – [Электронный ресурс] / OCME Pallet Checker – Режим доступа: https://www.industrysearch.com.au/ocme-pallet-checker/p/98767 – Заглавие с экрана. – яз. англ. (Дата обращения 11.12.2017)

28. Сайт компании KÖHL [офиц. сайт] – [Электронный ресурс] / Empty pallet checking system (LPK) – Режим доступа: http://www.koehl.eu/en/products/intralogistics/intralogistiq/empty-pallet-checking-system-lpk/#prettyPhoto – Заглавие с экрана. – яз. англ. (Дата обращения 13.12.2017)

29. Packaging revolution – [Электронный ресурс] / CHEP Improves Damage Inspection Scanning with Reflex Array Sensor – Режим доступа:

https://packagingrevolution.net/sick/ – Заглавие с экрана. – яз. англ. (Дата обращения 18.12.2017)

30. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля: практическое пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; под. ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1991. – 283с.

31. Королев, М.В. Безэталонные ультразвуковые толщиномеры / М.В. Королев. – М.: Машиностроение, 1985. – 80 с.

32. Физическая акустика / Под ред. У. Мезона. //Том I. Методы и приборы ультразвуковых исследований / М: Изд-во Мир, 1966. – 588 с.

33. Ермолов, И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И.Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.

34. Шляхтенок А.В. Ультразвуковая рельсовая дефектоскопия / А.В. Шляхтенок, Д.А. Довгяло // Вестник полоцкого государственного университета. Серия С: фундаментальные науки, Новополоцк , 2016 – С.: 64-70.

35. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие / В. Е. Гмурман. – 7-е изд., стер. – М. : Высшая школа, 2000. – 479 с.

36. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики. / ред. Е.М.Четыркина; пер. с английского В.С. Занадворова. – М.: Финансы и статистика, 1982, – 344 с.

37. Титов, С.А. Система акустической визуализации с матричным ультразвуковым датчиком/ Титов С.А., Маев Р.Г., Богаченков А.Н.// Датчики и системы. 2010. № 7. С. 18-21

38. Скорость звука и структура сталей и сплавов / Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. // Монография. – Новосибирск: Наука. 1996. – 184 с.

39. Shulgina, Y.V. Acoustic borehole depth-gauge with the dual-frequency sensing method/ Shulgina Y.V., Soldatov A.A., Shulgin E.M., Kudryashova A.V.// International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016: proceedings, 12-14 May 2016

40. Kostina, M.A. Software-hardware system for measurement of the pallet dimensions [Electronic resources]/ M.A. Kostina, P.V. Sorokin , S.I. Bortalevich and et al // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). : IEEE, 2017. – [P. 1–5].

41. Soldatov, A.I. Ultrasonic Borehole Depth-Gauge [Electronic resources]/ A.I. Soldatov, J. V. Shulgina (Chiglintseva) // International Siberian Conference on Control and Communications. Sibcon-2009 : proceedings Russia, Tomsk, March 27-28, 2009. – Tomsk: 2009. – [P. 313-317].

42. Солдатов, А.И. Точность измерений – залог эффективности производства. / Солдатов А.И., Цехановский С.А. //Оборудование Регион, 2004, – № 2. – с. 26-27.

43. Шульгина, Ю. В. Повышение точности определения временного положения эхо-импульса [Электронный ресурс] / Ю. В. Шульгина, А. И. Солдатов // Современные техника и технологии : сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 12-16 апреля 2010 гв 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – 2010. – Т. 1. – с. 288-289.

44. Шульгина, Ю.В. Повышение точности ультразвуковых измерений методом двух компараторов [Электронный ресурс] / Ю.В. Шульгина, А.И. Солдатов // Известия Южного федерального университета. Технические науки: научно-технический и прикладной журнал. – 2010. – Т. 110, № 9. – [С. 102-106].

45. Солдатов, А.И. Современные методы обработки акустических сигналов/ А.И. Солдатов и др.// Современные наукоемкие технологии, Издательский дом «Академия обществознания», Пенза, 2011г. №1, 84-87с.

46. Шестаков, С.А. Определение временного положения эхо-импульса методом аппроксимации огибающей, описываемой полиномами второй и третьей степени / С. А. Шестаков [и др.] // Электронные и электромеханические системы и устройства : XVIII научно-техническая конференция, 22-23 апреля 2010 г. тезисы докладов. – Томск: Полюс, 2010.

47. Солдатов, А.И. Применение методов огибающих второго и третьего порядков для определения временного положения эхо-импульса. / А.И. Солдатов, С.А. Шестаков, С.В. Пономарев // Известия Томского политехнического университета, 2010 – т. 317, – № 2. – с. 63-65.

48. Нобл, Б. Применение метода Винера-Хопфа для решения дифференциальных уравнений в частных производных. / Б. Нобл. - М. .: ИЛ, 1962. – 280с.

49. Солдатов, А.И. Определение временного положения акустического импульса методом аппроксимации огибающей сигнала. / Солдатов А.И., Сорокин П.В., Макаров В.С.// Известия Южного федерального университета. – Технические науки, 2009. – № 10. – с. 178-184.

50. Дичев, Н.В. Метод определения временного положения медленно нарастающего эхо-импульса /Н.В. Дичев, А.И. Солдатов, В.С. Макаров, П.В. Сорокин, И.И. Фикс// /Известия Томского политехнического университета, 2010 - т. 317, - № 4. - с. 146-149

51. Медицинская акустика: ультразвуковая диагностика медико-биологических сред. Авторы: Клемина А.В., Демин И.Ю., Прончатов-Рубцов Н.В. Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011. – 103 с.

52. Костина (Солдатова), М.А. Применение фазового метода для определения временного положения акустического импульса/ М.А. Костина (Солдатова), П.В. Сорокин, А.А. Солдатов// Известия Южного федерального университета. – Технические науки, 2010. – № 9 (110). – с. 97-102

53. Васичев Б.Н. Квантовая оптика в биологии и технике. Метод быстрой обработки и распознавания изображений глазом/ Васичев Б.Н., Рыбаков Ю.Л.// Медицина и высокие технологии. М.: Изд-во: РДК-Пресс, 2017 – С.: 17-21

54. Кониченко, А.А. Модель, алгоритм и специализированное устройство для классификации цифровых сигналов: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.05/ Кониченко Александр Александрович. – Юго–Зап. гос. ун-т, 2012 – 120 с.

55. Белоцерковский, Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. / Г. Б. Белоцерковский – М: Издательство «Советское радио»: Редакция литературы по вопросам космической радиоэлектроники – 1975.

56. Shulgina, Yu. V. The increase of ultrasound measurements accuracy with the use of two-frequency sounding [Electronic resource] / Yu. V. Shulgina [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81 : Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials. – 6 p.

57. Шульгина, Ю.В. Определение момента прихода эхо-импульса для метода двухчастотного зондирования. / Старостин А.Л., Асочаков А.С., Шульгина Ю.В. // Сборник трудов XXI Международной научной конференции "Современные техника и технологии" – 2015 –. С. 292–294.

58. Булгакова, О. В. Влияние уровня срабатывания компаратора на точность ультразвуковых измерений при двухчастотном методе зондирования / О.В. Булгакова, Ю. В. Шульгина // Электронные и электромеханические системы и устройства : XIX научно-техническая конференция, Томск, 16-17 апреля 2015 г.тезисы докладов. – Томск: Полюс, 2015. – с. 68-70.

59. Measurement error reducing in the ultrasound time-pulse systems [Electronic resource] / A. I. Soldatov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81 : Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials. – 10 p.

60. Соловьянова, И.П. Теория волновых процессов: Акустические волны [Текст]: Учебной пособие/ Соловьянова И.П., Шабунин С.Н.. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. - 142 с.

61. Шульгина, Ю.В. Акустический контроль глубины разведочных и эксплуатационных скважин на горнодобывающих предприятиях: : дис. ... канд. тех. наук: 05.11.13/ Шульгина Юлия Викторовна. – Т., 2018 – 126 с.

62. Shulgina, Y. V. The echo-impulse position detection by the dual-frequency sensing method/ Y. V. Shulgina, A. A. Soldatov, E. M. Shulgin, A. V. Stepanova // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) :

proceedings, Omsk, May 21-23, 2015. – Новосибирск: IEEE Russia Siberia Section, 2015 – p. 1-3.

63. Shulgina, Y. V. Mathematical analysis of the echo-impulse position detection by the dual-frequency sensing method [Electronic resources] / Yu.V. Shulgina [et al.] // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) : proceedings of the International Conference, Tomsk, 16-18 October, 2014 / National Research Tomsk Polytechnic University (TPU); Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). – [S. l.]: IEEE, 2014. – 4 p.

64. Горелик, Г.С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику (2-е издание). - М.: Физматлит, 1959. – 572 с.

65. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров; Пер. с франц. под ред. К.С.Шифрина.- М.: Наука, 1965. – 780 с.

66. Кунегин, С.В.. Системы передачи информации. Курс лекций. М., 1997, - 317 с

67. Верлань, А. Ф. Мультипликативная обработка угловых спектров акустических когерентных изображений [Текст] / А. Ф. Верлань, И. М. Гвоздева, // Электронное моделирование. – 2005. – Т. 27, №5. – С. 53 – 62

68. Корн Г. , Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) М.:Наука 1970. 720 с.

69. Пупкова К.А, Егупова Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, с. 656.

70. Mustafa Karaman, Pai Chi Li, Matthew O'Donnell. Synthetic Aperture Imaging for Small Scale Systems. // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1995, V. 42, Issue 3, pp. 429-442.

71. Chiao, R.Y. and Thomas, L.J. Analytical evaluation of sampled aperture ultrasonic imaging techniques for NDE. // Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, 1994; 41(4):484-493

72. Y. Labyed, L. Huang, Ultrasound time-reversal MUSIC imaging with diffraction and attenuation compensation // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectrics, Frequency Control 59 (2012) 2186-2200.

73. F.K. Gruber, E.A. Marengo, A.J. Devaney Time-reversal imaging with multiple signal classification considering multiple scattering between the targets, J. Acoust. Soc. Am. 115 (2004) 3042-3047.

74. E.A. Marengo, F.K. Gruber, F. Simonetti, Time-reversal MUSIC imaging of extended targets // IEEE Trans. Image Process. 16 (2007) 1967-1984.

75. R. Schmidt, Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Trans. Anten. P. 34 (1986) 276-280.

76. J.W. Odendaal, E. Barnard, C.W.I. Pistorius, Two-dimensional super resolution radar imaging using the MUSIC algorithm // IEEE Trans. Anten. P. 42 (1994) 1386-1391.

77. T. Iwata, Y. Goto, H. Susaki, Application of the multiple signal classification (MUSIC) method for one-pulse burst-echo Doppler sonar data // Meas. Sci. Technol. 12 (2001) 2178-2184.

78. E.G. Asgedom, L.-J. Gelius, A. Austeng, S. Holm, M. Tygel, Time-reversal multiple signal classification in case of noise: a phase-coherent approach // J. Acoust. Soc. Am. 130 (2011) 2024-2034.

79. Качанов В.К., Соколов И.В. Требования к выбору параметров широкополосных преобразователей для контроля изделий с большим затуханием ультразвуковых сигналов. Дефектоскопия. 2007. № 11. С. 47-62

80. Завадский, В.Ю. Моделирование волновых процессов./ В.Ю. Завадский. – М. : Наука, 1991. – 248 с.

81. Боев В.Д., Сыпченко Р.П., Компьютерное моделирование. — ИНТУИТ.РУ, 2010. — 349 с.

82. Абрамов И.С., Обрусник В. П. Теория автоматического управления.- Томск: Ротапринт ТПИ, 1991. - 30 с.

83. Сергиенко А.Б. «Цифровая обработка сигналов». Учебник для вузов. СПб.: Питер. 2006.

84. Паничев В.В., Соловьев Н.А. Компьютерное моделирование: учебное пособие. — Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. -- 130 с.

85. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. — М.: Физматлит, 2001. — 320 с.

86. Воробьев, М.И. Проектирование электронных устройств. – М.: Высш.шк., I989. – 233 с.

87. Малахов В.П. Схемотехника аналоговых устройств: Учебник. – Одесса: Астропринт, 2000. – 212 с

88. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.

89. Kostina, M.A. A device for measuring the linear dimensions of the pallet by echolocation method/ M.A. Kostina // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность : сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 25-29 мая 2015 г.в 2 т. / ТПУ. — Т. 2. — [С. 442-443].

90. Kostina, M.A. Acoustic method to measure the geometric parameters of pallets/ M.A. Kostina// Иностранный язык в контексте проблем профессиональной коммуникации.Материалы II Международной научной конференции. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2015

91. Костина, М.А. Информационно-интеллектуальная система измерения размеров паллет/М.А. Костина, П.В. Сорокин, О.А. Кожемяк// Информационно-измерительная техника и технологии: материалы VII научно-практической конференции (25–28 мая 2016 г.)VII г.Томск, 25 - 28 мая 2016 г./ Томский государственный университет (ТГУ) - [С. 586-596]

92. Костина, М.А Измерение геометрических параметров поддонов акустическим методом/ М.А. Костина, Д.А. Солдатов// Неразрушающий контроль : сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции "Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии,

безопасность", Томск, 23-27 мая 2016 г. : в 3 т. — Томск : Изд-во ТПУ, 2016. — Т. 2. — [С. 108-111].

93. Костина, М.А. Многоканальная акустическая система контроля паллет/ М.А. Костина, // Сборник научных трудов IV Всероссийского молодежного Форума с международным участием "Инженерия для освоения космоса". Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2016 - [С. 187-189]

94. Костина, М.А. Исследование погрешностей измерений при двухчастотном методе зондирования на основе математического моделирования/ М.А. Костина, А.И. Солдатов, П.В. Сорокин, А.А. Солдатов, Ю.В. Шульгина// Дефектоскопия , № 1, 2019

95. Kostina, M.A. Simulation of acoustic signals in a waveguide of circular cross section/ M.A. Kostina, Y.V. Shulgina, A.L. Starostin, T.S. Mylnikova, A.I. Soldatov // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems: Proceedings of International Conference, Tomsk, December 1-4, 2015. – Tomsk: TPU Publishing House, 2015 – p. 1-4.

96. Kostina, M.A. System for automatic sorting of pallets/ M.A. Kostina, P.V. Sorokin, S.I. Bortalevich [et al]// 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON).: IEEE, 2016. С. 1–4.

97. Kostina, M.A. Distance determination based on dual frequency method with phase correction/ M.A. Kostina, Y.V. Shulgina, P.V. Sorokin, E.M. Shulgin, Y.V. Rozanova // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 – Proceedings. 29-30 June 2017.

98. Kostina, M.A. Inaccuracy of acoustic measurements in dual-frequence method of sounding/ M.A. Kostina, Y.V. Shulgina, A.I. Chudinova// MATEC Web of Conferences – 2018

99. 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].

100. 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].

101. 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].

102. Kostina, M.A. 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].

103. Kostina, M.A. 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.].

104. Kostina, M.A. 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].

105. Kostina, M.A. 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.].

106. Kostina, M.A. 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]

107. Костина, М.А. Исследование многослойных ультразвуковых пьезоэлементов/ М.А. Костина, А. И. Селезнев // Неразрушающий контроль: сборник научных трудов всероссийской молодежной школы-конференции, Томск, 16-18 Августа 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - С. 175-181

108. 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].

109. Селезнев, А.И. Визуализация акустического поля в круглом волноводе/ А.И. Солдатов, А.И. Селезнев//Известия Южного федерального университета. Технические науки научно-технический и прикладной журнал. – 2009. – № 10. – [С. 173-178].

110. Soldatov, A.I. Estimation of the error when calculating the arrival time of a detected echo-signal/ Soldatov A.I., Seleznev A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Makarov V.S. // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012. Т. 48. № 5. С. 268-271.

111. Kvasnikov, K.G. The use of geometrical acoustics for the solution of visualization problems/ K.G. Kvasnikov, A.I. Soldatov, I.O. Bolotina, K.M. Krening, A.A. Potapenko// Russian Journal of Nondestructive Testing. 2013. Т. 49. № 11. С. 625-630.

112. Рябов, В.А. Механизмы приема и проведения звука у дельфина//Биофизика. М.: Изд-во: Российская академия наук, 2014 – С.: 579-590

113. Стретт Дж.В. (лорд Рэлей). Теория звука. Том 2, Естественные науки. Издательство технико-теоретической литературы, 1955г. – 503 с.

114. Salmon, V. Generallized plane wave horn theory // Journal of the Acoustical Society of America – V.17, №3, 1946 – [P. 199 – 218]

115. Wilson, P.&G.L. Horn theory and the phonograph / 83rd meeting of Acoustical Society of America, April 1972.

116. Beranek, L.L. Acoustic / McGraw Hill, 1954.

117. Солдатов А.И. Ультразвуковая аппаратура с волноводным акустическим трактом: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: спец. 05.11.13 / А.И. Солдатов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; науч. конс. Г. С. Евтушенко. – Томск, 2011. – 40 с.

118. Сайт компании MURATA [офиц. сайт] – [Электронный ресурс] /Режим доступа: https://www.murata.com/en-eu/products/capacitor/mlcc/apps/fa – Заглавие с экрана. – яз. англ. (Дата обращения 07.10.2016).

119. Скучик Е. Основы акустики. В 2 т. Т. 1. – М.: Мир, 1976. – 520 с.

120. Скучик Е. Основы акустики. В 2 т. Т. 2. – М.: Мир, 1976. – 542 с.

121. Шрайбер Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Металлургия, 1965. – 416с.

122. Выборнов, Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия / Б.И. Выборнов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

123. Ультразвуковые преобразователи / Под ред. Е. Кикучи; Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 424 с.

124. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Под общ. ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.

125. Красильников В. А. Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. 3-е изд. М., 1960.

126. 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.

127. 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.

128. 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.

129. 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.

130. Berke M., Bechler J. Ultrasonic imaging in automatic and manual testing. // ECNDT 2006 - We.3.1.5

Приложение А. Акт внедрения результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
ОАО «Томское пиво»
МатяхВ.Н

АКТ
внедрения результатов диссертационной работы Солдатовой М.А.

Мы, нижеподписавшиеся, начальник отдела КИПиА Киреев В.С., метролог Матюхин В.В., составили настоящий акт в том, что ультразвуковой дефектоскоп паллет, созданный на кафедре ПМЭ ТПУ внедрен в технологический процесс предприятия. В приборе использованы следующие результаты научных исследований по диссертационной работе Солдатовой М.А.:

1. Способ обработки акустических сигналов, обеспечивающий в сравнении с известными аналогами лучшие метрологические характеристики, защищенный патентом РФ.
2. Алгоритм обработки акустических сигналов, обеспечивающий представление результатов контроля в виде трехмерного изображения модели палетт.
3. Устройство обработки акустических сигналов, защищенное патентом РФ.

Нач.отдела КИПиА Киреев В.С.
Метролог Матюхин В.В.

Приложение Б. Акт внедрения разработки в учебный процесс ТПУ

TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИШНКБ ТПУ,
_____ Д.А. Седнев
«__» марта 2019 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы

Костиной Марии Алексеевны

Комиссия в составе:

председатель: руководитель отделения электронной инженерии, к.т.н., Баранов П.Ф, члены комиссии: доцент отделения электронной инженерии, к.т.н., Аристов А.А., доцент отделения электронной инженерии, к.т.н., Огородников Д.Н. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Костиной М.А. «Акустический контроль геометрических параметров паллет», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, используются в учебном процессе Отделения электронной инженерии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета в методических материалах дисциплины: «Электронные промышленные устройства», а также при подготовке магистерских диссертаций и курсовых проектов студентами ТПУ.

Председатель комиссии П.Ф. Баранов

Члены комиссии А.А. Аристов

Д.Н. Огородников