

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

На правах рукописи

Козин Алексей Владимирович

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ ВВОДА
ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

2.3.2. Вычислительные системы и их элементы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Фрейман Владимир Исаакович

Пермь, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Обзор и анализ моделей, методов разработки и инструментов реализации вычислительных систем сенсорных устройствах ввода информации.....	11
1.1. Аналитический обзор принципов функционирования, технологий изготовления и эксплуатационных характеристик сенсорных устройств ввода информации	11
1.2. Анализ особенностей реализации вычислительных систем акустических сенсорных устройств ввода информации	16
1.3. Анализ требований к функционированию акустических сенсорных устройств ввода информации и их вычислительных систем в сложных и специфических условиях эксплуатации	23
1.4. Математическая постановка задачи диссертационного исследования ...	25
1.5. Выводы по главе	27
2. Разработка и исследование способа локализации источника звука вычислительной системой акустического сенсорного устройства ввода информации	28
2.1. Обзор и анализ способов локализации источника звука.....	28
2.2. Анализ распространения звука в твердых не криволинейных телах и его возможная локализация	29
2.3. Описание предложенного способа локализации места касания	32
2.4. Разработка и исследование программной модели для анализа распространения звуковой волны по поверхности экрана и локализации источника звука в среде моделирования Comsol.....	35
2.5. Экспериментальное исследование предложенного способа локализации места касания на разработанном опытном образце.....	40
2.6. Выводы по главе	43

3. Разработка и исследование математических и программных моделей определения местоположения точки касания вычислительной системой акустических сенсорных устройств ввода информации	45
3.1. Анализ математических моделей, методов и алгоритмов определения местоположения точки касания сенсорных устройств	45
3.2. Разработка аналитической модели определения местоположения точки касания	50
3.3. Разработка численной модели определения местоположения точки касания	53
3.4. Разработка программных моделей локализации точки касания	57
3.5. Экспериментальное исследование разработанных моделей локализации точки касания.....	63
3.6. Выводы по главе	65
4. Создание метода разработки вычислительной системы сенсорного устройства ввода информации на основе акустических измерительных преобразователей....	67
4.1. Обзор и анализ методов разработки вычислительных систем акустических сенсорных устройств.....	67
4.2. Назначение и описание основных этапов предложенного метода.....	70
4.3. Структура и состав аналитических этапов метода	71
4.4. Структура и состав прикладных этапов метода.....	77
4.5. Алгоритм применения предложенного метода разработки вычислительной системы акустических сенсорных устройств	81
4.6. Выводы по главе	83
5. Апробация и внедрение результатов диссертационного исследования на предприятии и в учебном процессе.....	84
5.1. Апробация и внедрение на предприятии ПАО «ПНППК»	84

5.1.1.	Описание объекта внедрения	84
5.1.2.	Анализ требований и качественных результатов внедрения.....	84
5.1.3.	Техническое обеспечение разработанной вычислительной системы.....	86
5.1.4.	Алгоритмическое обеспечение разработанной вычислительной системы 87	
5.1.5.	Программное обеспечение вычислительной системы.....	89
5.1.6.	Условия и результаты внедрения.....	91
5.2.	Апробация и внедрение в учебный процесс ФГАОУ ВО «ПНИПУ».....	93
5.3.	Выводы по главе	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		95
Список литературы		97
Приложение А		112
Приложение Б		116
Приложение В.....		118
Приложение Г		120
Приложение Д.....		121
Приложение Е.....		122

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Сенсорные устройства ввода информации находят широкое применение в самых различных сферах, например, промышленность, медицина, безопасность, бытовая электроника. Развитие отечественной промышленности в сфере разработки, производства и эксплуатации таких устройств и их вычислительных систем открывает новые перспективы для эффективного применения, особенно с учетом экономической и политической ситуации. Достаточно часто приборы и системы с подобными устройствами ввода информации приходится использовать в неблагоприятных и специфических условиях: климат (пустыня, море, холод), производство (химическое, металлургическое), добыча (полезные ископаемые), государственная и общественная безопасность и т.д. На надежность и качество функционирования при этом оказывают влияние как принципы функционирования, материалы и технологии изготовления, так и характеристики встроенных вычислительных систем.

Возрастание потребности в сенсорных устройствах ввода информации, предназначенных для эксплуатации в экстремальных условиях, приводит к следующему *противоречию*: улучшение эксплуатационно-технических характеристик, таких как надежность, точность и быстродействие, требует повышения вычислительной сложности и усложнения конструкции устройств, что, в свою очередь, увеличивает затраты на разработку и производство, а также ограничивает их массовое применение. Упрощение устройств, в свою очередь, приводит к ухудшению их эксплуатационно-технических характеристик. *Научная гипотеза* настоящего исследования заключается в том, что сформулированное противоречие может быть разрешено за счет разработки и внедрения новых методов проектирования вычислительных систем, которые основываются на уникальных конструкторских решениях устройств ввода информации. Таким образом, актуальной задачей становится создание и реализация методов обработки сигналов. В работе предлагается использование регистрации акустических волн,

распространяющихся по поверхности сенсорной основы устройства ввода, а также оригинальные модели и методы локализации места касания. При этом обеспечивается высокая точность и быстродействие вычислительной системы и надежность функционирования ус устройства ввода информации.

Степень разработанности темы исследования. Разработке способов локализации места касания вычислительной системой с помощью звуковых волн посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: Анцева И.Г., Машкова В.М., Qin M., Donoho D.L., Thakallapalli S., Gangashetty S.V., Lin W. и др. При этом перспективными представляются дальнейшие исследования в области уменьшения сложности алгоритмов локализации и упрощения технического обеспечения вычислительных систем при выполнении требований к их надежности.

Созданию моделей локализации источника звуковых волн посвящены публикации Львова А.В., Агапова М.Н., Тищенко А.И., Reis S., Sun K., Zhao T., Yang Z. и др. В развитие полученных результатов актуальна разработка новых математических моделей для улучшения точности и быстродействия вычислительных систем.

Методы разработки вычислительных систем акустических сенсорных устройств ввода информации исследовались в трудах Штрапенина Г.Л., Мишана М., Самарина А.В., Correia V., Martins M., Barbosa G., Liu Y., Zhang H.L., Benard D.J., Tsumura M. и др. Несмотря на это, актуальными и перспективными задачами остается создание комплексных подходов к разработке вычислительных систем акустических сенсорных устройств ввода информации, учитывающих новые физические принципы действия и конструкции, способы и модели локализации.

Выводы, сформулированные на основе проведенного аналитического обзора источников, позволяют утверждать, что выбранная тематика исследования представляется актуальной.

Объектом исследования является вычислительная система акустических сенсорных устройств ввода информации.

Предметом исследования являются способ и модели локализации точки касания, а также метод проектирования вычислительных систем акустических сенсорных устройств ввода информации.

Цель диссертационного исследования заключается в улучшении эксплуатационно-технических характеристик вычислительных систем акустических сенсорных устройств ввода информации.

Для реализации поставленной цели исследования определены и решены следующие **задачи**:

1. Аналитический обзор и анализ моделей, методов и инструментов реализации вычислительных систем сенсорных устройств ввода информации и требований к ним; математическая постановка задачи.

2. Разработка и исследование способа локализации места касания с помощью звуковых волн, распространяющихся по экрану (подложке) сенсорного устройства ввода информации.

3. Построение и верификация математических и программных моделей позиционирования точки касания, реализуемых вычислительной системой акустических сенсорных устройств ввода информации.

4. Создание метода проектирования вычислительной системы сенсорного устройства ввода информации на основе акустических измерительных преобразователей.

5. Апробация и внедрение результатов диссертационного исследования.

Положения, выносимые на защиту и обладающие **научной новизной**:

1. *Способ локализации* места касания с помощью колебаний, распространяющихся по основе сенсорного устройства ввода информации, основанный на *оригинальном подходе* к обработке фрагмента звуковой волны (наличие только трех неспециализированных приемников акустических сигналов, анализ только первого экстремума, отсутствие необходимости записи шаблонов и анализа полной формы сигналов), *что дает возможность* уменьшить сложность технического и информационного обеспечения вычислительной системы при выполнении требований к надежности функционирования (п. 5 «Разработка

научных методов и алгоритмов организации арифметической, логической, символьной и специальной обработки данных, хранения и ввода-вывода информации» паспорта специальности 2.3.2).

2. *Математические и программные модели* определения места точки касания вычислительной системой акустического сенсорного устройства ввода информации, *отличающиеся* отсутствием определения направления на источник сигнала (триангуляция) и использования временной синхронизации (трилатерация), *что позволяет* повысить точность и быстродействие алгоритмов расчета и сократить вычислительную сложность при реализации, в том числе в низкопроизводительных вычислительных системах (п. 4 «Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования вычислительных систем и их элементов в нормальных и экстремальных условиях с целью улучшения их технико-экономических и эксплуатационных характеристик» паспорта специальности 2.3.2).

3. *Метод разработки вычислительной системы* сенсорного устройства ввода информации на основе акустических измерительных преобразователей, *оригинальность* которого заключается в применении комплексного подхода: итеративность, разбиение на аналитические и проектно-технологические этапы, взаимосвязанность процедур анализа и синтеза на каждом этапе, направленность на практическую реализацию и внедрение, *что дает возможность* повысить технологичность изготовления и повысить эксплуатационно-технические характеристики изделия (п. 2 «Разработка принципиально новых методов анализа и синтеза вычислительных систем и их элементов с целью улучшения технических характеристик, включая новые процессорные элементы, сложно-функциональные блоки, системы и сети на кристалле, квантовые компьютеры» паспорта специальности 2.3.2).

Теоретическая значимость результатов работы заключается в создании способа, моделей и метода разработки, которые позволяют усовершенствовать научно-методологическую основу для построения вычислительных систем

устройств ввода информации разных принципов действия, конструкции, применения.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что предложенный инструментарий в виде моделей, метода и алгоритмов реализован и использован для проектирования и реализации сенсорных устройств ввода информации в приборах производства ПАО «ПНППК», предназначенных для работы в сложных и специфических условиях. По основным показателям отмечено, что внедрение результатов исследования (замена механической клавиатуры на акустическую сенсорную) позволило:

- увеличить наработку на отказ устройств ввода в составе изделий на 11 %;
- увеличить гарантийные сроки эксплуатации изделий в среднем на 12 %;
- уменьшить время отклика при взаимодействии с пультами управления на 32 %.

Разработанные способ и модели определения места касания вычислительной системой, а также метод разработки вычислительных систем сенсорных устройств ввода информации были применены в учебном процессе ФГАОУ ВО «ПНИПУ» в содержании дисциплин «Программирование и основы алгоритмизации», «Численные методы», «Цифровая обработка сигналов», «Встроенные микропроцессорные системы» для направлений подготовки 11.03.02, 15.03.06, 27.03.04.

Методология и методы исследования. Методологическая основа исследований построена на аппарате математического анализа, численных методах, инструментарии аналитического и имитационного моделирования, алгоритмах цифровой обработки сигналов.

Достоверность и обоснованность результатов. Полученные в диссертационной работе результаты не противоречат теоретическим положениям, известным из научных публикаций отечественных и зарубежных исследователей, и подтверждаются результатами апробации и практического применения предложенных в диссертации способа, моделей и метода в вычислительных системах сенсорных устройств ввода информации.

Основные положения диссертационной работы докладывались на Всероссийских и международных конференциях в городах Санкт-Петербург, Пермь, Нижневартовск и т.д., где получили положительную оценку. Результаты диссертационного исследования представлялись на конкурсе «Акселератор «Большая разведка – 2023», по итогам которого был получен диплом I степени. По результатам конкурса «УМНИК-2021» был получен грант на проведение научных исследований от Всероссийского фонда содействия инновациям и предприятия АО «ЭР-Телеком Холдинг».

Публикации. Основные положения диссертационного исследования нашли отражение в 9 научных работах, из них 3 статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях, 1 работа в издании, индексированном в международной базе цитирования Scopus, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 111 страниц основного текста, 7 таблиц, 44 рисунков, 6 приложений. Список использованной литературы включает 116 наименований.

1. Обзор и анализ моделей, методов разработки и инструментов реализации вычислительных систем сенсорных устройствах ввода информации

В системах управления общего и специального назначения часто используются панели управления, основанные на механических или пленочных клавиатурах. Эти клавиатуры срабатывают благодаря механическому перемещению кнопок, что приводит к замыканию контактов при нажатии. Однако их надежность ограничена износом, который чаще всего вызван окислением контактов, потерей упругости или механическим разрушением элементов кнопок. Обычно ресурс работы таких клавиатур составляет около 100 тысяч нажатий для кнопочных моделей, 400-500 тысяч для силиконовых и до 1 миллиона нажатий для пленочных. Также стоит отметить, что при механическом повреждении верхней поверхности клавиш в процессе эксплуатации требуется полная замена клавиатуры, так как она теряет свою функциональность.

Существуют устройства ввода с другим принципом действия – сенсорные. Отличительной особенностью конструкции сенсорных устройств ввода информации по сравнению с механическими является отсутствие механических частей. Это способствует высокой отказоустойчивости и продолжительному сроку службы. В некоторых типах сенсорных устройствах ввода информации можно оперативно (программно) менять функциональное назначения клавиш (смартфоны, планшеты и т.п.), что делает их идеальным выбором, для замены механическим.

1.1. Аналитический обзор принципов функционирования, технологий изготовления и эксплуатационных характеристик сенсорных устройств ввода информации

Устройства ввода информации – это аппаратное средство, которое позволяет пользователю (оператору) вводить данные и команды в электронную систему [1-3]. Эти устройства преобразуют физические действия человека (например, нажатие клавиш, движение пальцем) в цифровые сигналы, которые могут быть обработаны

вычислительной системой. В частности, сенсорные устройства ввода информации – это тип устройств, которое позволяют пользователю взаимодействовать с компьютером или другим электронным устройством через прикосновения. Такие устройства используют сенсорные технологии для распознавания касаний, что делает их очень удобными для пользователя и технологичными для изготовления и применения [4].

Сенсорные устройства ввода информации можно разделить на три физических принципа действия по способу определения места касания [5-8]:

- матриц (сеток);
- излучений;
- акустических сигналов.

Сенсорная основа устройств ввода первого принципа действия состоит из двух пластин, расположенных друг напротив друга. Верхняя пластина гибкая, нижняя жестко зафиксирована. Между ними расположены либо микроизоляторы, являющиеся диэлектриками (резистивная технология [9, 10]), либо нанесено проводящее покрытие (емкостная технология [11]), либо сетка проводников (матричная технология [12, 13]). По краям поверхностей установлены электроды, на которые постоянное напряжение. Когда пользователь взаимодействует с экраном, один слой касается другого. В случае резистивной технологии происходит падение напряжения, в случае емкостной – утечка тока, в случае матричной – замыкание проводников. Пример резистивной сетки можно увидеть на рисунке 1.1 [14]. В общем случае у всех трех технологий аналоговый-цифровой преобразователь (АЦП) формирует сигнал, по которому микроконтроллер производит расчеты и определяет место касания.

Характеристики таких устройств следующие: антивандальное покрытие отсутствует, температурный режим работы от -15°C до $+70^{\circ}\text{C}$; не восприимчивы к яркому солнечному свету, воде и конденсату; реагирует как на палец, так и на другие различные предметы (за исключением емкостных). Они отличаются простотой изготовления и малой стоимостью, однако имеют низкую надежность:

самые простые и дешевые выдерживают от 0,5 до 100 миллионов нажатий в одну точку, а некоторые технологии восприимчивы к температуре окружающей среды.

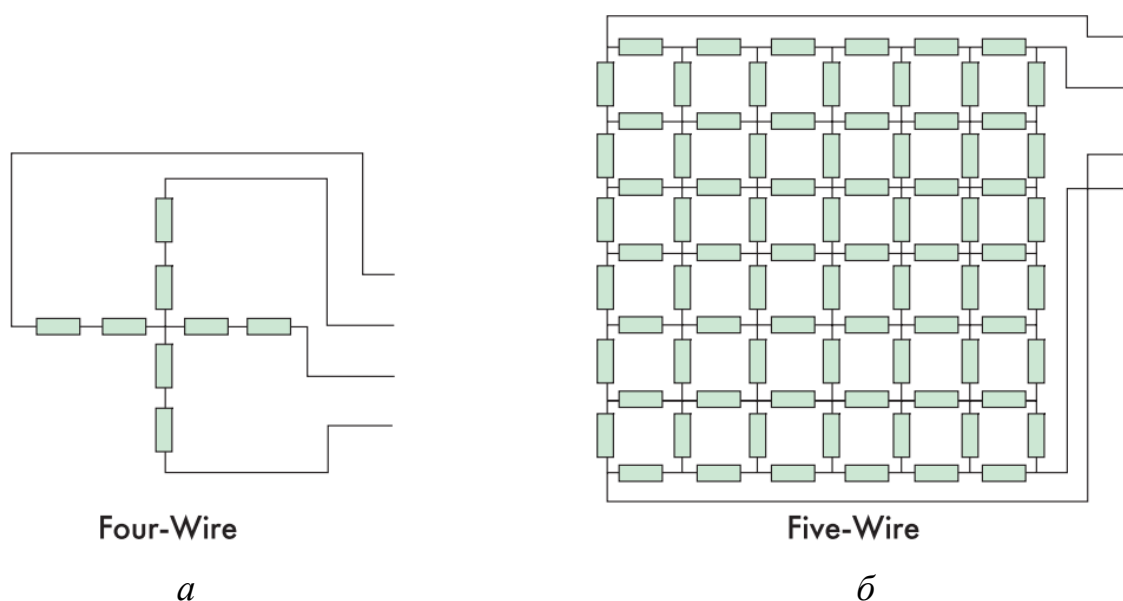


Рисунок 1.1 – Пример резистивной решетки сенсорного устройства ввода: *а* – четырехпроводная; *б* – пяти проводная

Технология сенсорных устройств ввода на основе излучений – это технология, использующая оптические свойства подложки для создания сенсорной области, а именно – распространение инфракрасных (ИК) или иных лучей поверх или внутри экрана [15]. В первом случае работа данного вида экранов заключается в том, что по его двум сторонам размещены LED-светодиоды, которые формируют невидимую сеть, по двум противоположным сторонам размещены фотоприемники[16]. Пример такого сенсорного устройства можно увидеть на рисунке 1.2 [17]. Во втором случае внутри стеклянной панели расположен источник инфракрасных лучей, которые свободно проникают через стекло. В свою очередь ИК камера следит за появлением пятен на однородном фоне экрана [18]. В зависимости от того, как используются лучи: либо по полному внутреннему их отражению, либо по отражениям и тени, либо по прерыванию, на камере или фотодиоде формируется сигнал, поступающий на контроллер, который по полученным сигналам вычисляет местоположение точки касания.

Характеристики сенсорных экранов на основе излучений: присутствует антивандальность (в зависимости от технологии); температурный режим работы от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$; не реагирует на солнечный свет (в зависимости от технологии) и жидкость; реагирует на палец и другие различные предметы. Точность локализации средняя – до нескольких пикселей. Является одной из самых дорогих и громоздких (по массогабаритным размерам) технологий.

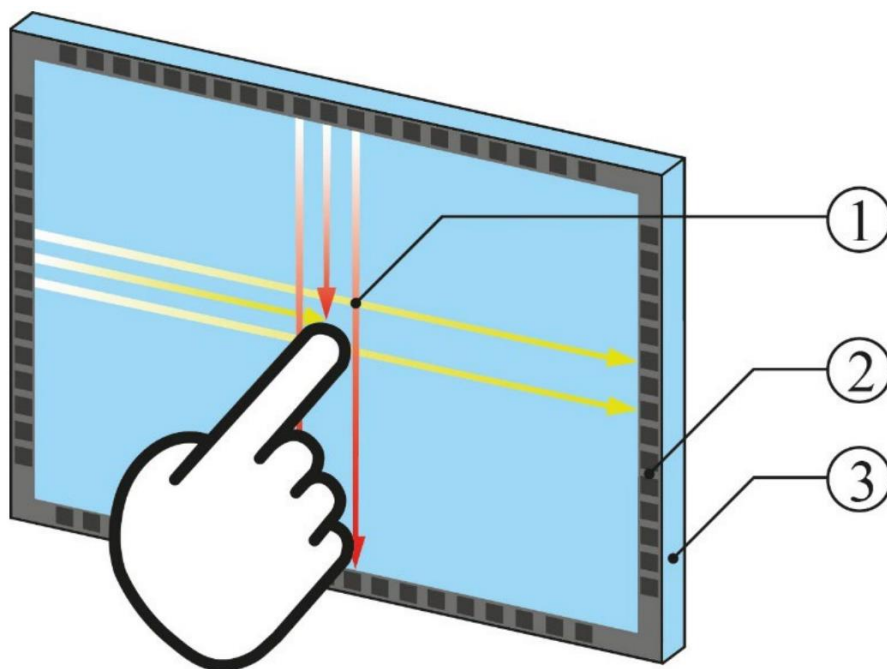


Рисунок 1.2 – Пример ИК сенсорного устройства ввода, где 1 – инфракрасные лучи, 2 – инфракрасная рамка, 3 – корпус

Устройства третьего принципа действия основаны на использовании акустических (звуковых) сигналов, которые изменяются или образуются при нажатии. Всего можно выделить два принципа действия акустических устройств: использующие излучатели и приемники, использующие только приемники [19].

Работа устройства, построенного по первому принципу заключается в том, что по основе экрана излучатели, находящиеся по периметру, запускают поток акустических волн, которые отражаются с помощью отражателей и возвращаются на приемники. При отсутствии касания сигнал на приемнике постоянный и однородный. При контакте поток звуковых волн на поверхности нарушается и,

исходя из этого определяется местоположение касания [20]. Второй принцип основан на распознавании специфического звукового сигнала, генерируемого в момент касания любой точке сенсорной панели. Сигнал, который принимают несколько регистрирующих устройств, оцифровывается и либо сравнивается с ранее записанными в контроллер эталонами, либо обрабатывается с целью восстановления полной картины распространения волн [21].

Характеристики таких устройств ввода: присутствует антивандальность (в зависимости от технологии); температурный режим работы от -20°C до +50°C; не реагирует на солнечный свет; реагирует на палец, другие различные предметы и жидкость. Основным недостатком является необходимость периодической калибровки, и сложность исполнения.

Для разрабатываемого устройства ввода информации выбран третий принцип, основывающийся на регистрации распространяющихся по поверхности акустических волн, что позволяет обеспечить выполнение всех перечисленных требований. Это будет выполняться за счет небольшого количества периферийных устройств (микрофоны, фильтры, контроллер, АЦП), быстрых алгоритмов и отсутствия хрупких частей. В общем виде сравнение описанных технологий приведено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнение сенсорных устройств ввода информации

Требования	Использующие матрицы			Использующие излучение		Использующие звук		Разрабатываемое устройство
	Резистивные (Elo Touch 1515L, GenTouch 12.1, AD-TM1024 и др.)	Матричные (ZYBRID Touch Sensors, HDM3224TS-1 и др.)	Емкостные (Elo Touch 2202L, ViewSonic TD2230, Planar PL1700 и др.)	Инфракрасное излучение (G4 IR Touch Frame, IR Touch Screen Monitor и др.)	Оптические (MultiSync Interactive Flat Panel, Optical Touch System и др.)	Поверхностно акустические волны (Elo Touch 1540L, SAW Touchscreen Solutions и др.)	Дисперсионные сигналы (DST Touch Screen, DST Interactive Displays и др.)	
Погрешность локализации, мм	1-2	2-5	1-2	2-5	2-3	2-3	1-2	1
Точность алгоритма локализации, %	99	99	99	95	95	95	97	98
Время отклика, мс	10-100	10-100	10-100	10-100	10-100	10-100	1-10	0,1-10
Рабочая температура, °C	-10...+35	-10...+60	-15...+70	-20...+70	-20...+50	-20...+50	-20...+50	-60...+70
Нажатия на одну кнопку, млн ед.	1 - 5	0,5 - 2	10 - 100	10 - 50	5 - 10	1 - 5	5 - 20	> 100
Полный ресурс (срок службы), лет	3 - 7	3 - 5	5 - 10	5 - 10	4 - 8	3 - 6	4 - 8	> 10
Наработка на отказ, тыс. ч	30 - 50	20 - 40	50 - 100	50 - 70	40 - 60	30 - 50	40 - 80	> 100
Диагональ, дюймы	Любые	Любые	Любые	От 32	От 20	От 13 до 32	От 13 до 32	Любые
Распознавание любого касания	Да	Да	Только токопроводящие тела	Да	Да	Только тела, поглощающие акустические волны	Да	Да
Функционирование при загрязнении	Да	Да	Да	Нет	Да	Нет	Да	Да
Устойчивость к вандализму	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Да	Нет	Да

Таким образом, каждое устройство ввода информации обладает своими преимуществами и недостатками, что подтверждает актуальность создания устройств, имеющих максимальные показатели по всем требованиям.

1.2. Анализ особенностей реализации вычислительных систем акустических сенсорных устройств ввода информации

Устройства ввода информации, основанные на использовании звуковых волн, позволяют реализовать разные варианты исполнения встроенных в них вычислительных систем. Это обусловлено тем, что звук, распространяющийся по поверхности сенсорной панели или непосредственно внутри неё, может обрабатываться различными методами, в зависимости от архитектуры самой вычислительной системы устройства. Согласно проведенной в параграфе 1.1 классификации, устройства этой категории можно условно разделить на два типа: те, которые используют как излучатели, так и приемники, и те, которые используют только приемники. Соответственно, вычислительные системы также делится на два типа.

Первый тип вычислительных систем рассмотрен в работах [22-35]. Далее проведен анализ наиболее часто реализуемых на практике вычислительных систем указанного типа.

Вычислительная система сенсорного устройства ввода, основанная на поверхностных акустических волнах [22]. Эта система состоит из как минимум двух пьезоэлектрических генераторов поверхностных акустических волн и двух пьезоэлектрических приемников, расположенных в углах панели устройства и преобразующих поток акустических волн в электрические сигналы. Помимо этого, в состав системы входят отражатели, расположенные по периметру рабочей панели, контроллер, соединенный с приемниками, и система опорных элементов, установленных на поверхности панели для разделения сплошного потока акустических волн на горизонтальные и вертикальные перпендикулярные потоки с несущей частотой около 5 МГц. Эти потоки формируют координатную матрицу на

поверхности панели. Поверх устройства размещена лицевая пленка с клавишами, которые опираются на опорные элементы, создавая воздушный зазор между ней и панелью. Координатная матрица по горизонтальной и вертикальной оси соответствует строкам и столбцам кнопок.

Такая конструкция упрощает алгоритм определения места касания, так как вместо сравнения аналоговых сигналов равномерности фронта акустической волны с эталонной картой экрана в данном устройстве ввода вычислительная система преобразует прерывистую поверхностную акустическую волну в электрический сигнал с регулярной импульсной формой. Затем подсчитываются импульсы по вертикальной и горизонтальной осям. Уменьшение амплитуды одного из импульсов ниже порогового значения, как показано на рисунке 1.3, указывает на нажатие кнопки, а определение его номера позволяет точно ее идентифицировать.

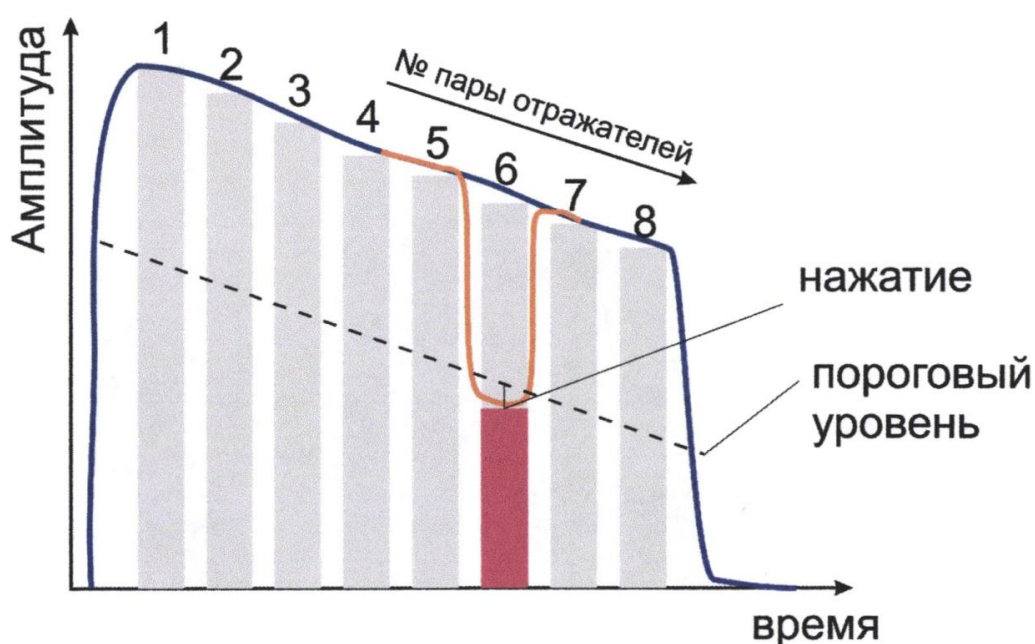


Рисунок 1.3 – Изменение амплитуды пары отражателей при касании с панелью

Вычислительная система, представленная в [24], использует для локализации места касания метод инвертированной фазовой передачи. Как и в ранее описанных работах, сигнал, генерируемый излучателем, направляется на сенсорную панель и поступает на приемник, расположенный рядом с излучателем. Отличительной

особенностью этой системы является то, излучатель формирует два вида сигнала: с фазами 0° и 180° . Амплитуда сигнала, отраженного от края, значительно меньше амплитуды сигнала, отраженного от точки касания. Сигнал отражения от кончика пальца можно четко отличить от нескольких типов отраженных сигналов. На каждый приемник поступает сигнал, показанный на рисунке 1.4, где выделенная часть является отражением от кончика пальца, и далее отправляется в контроллер.

В контроллере производится вычисление места касания с помощью метода задержки и суммирования. На основе времени прихода отраженного сигнала и скорости звука (фазовой скорости) вычисляется расстояние до объекта. Информация от нескольких датчиков комбинируется. Значения амплитуд полученного сигнала суммируются в зависимости от расстояния до каждого сенсора, что позволяет более четко локализовать место касания.

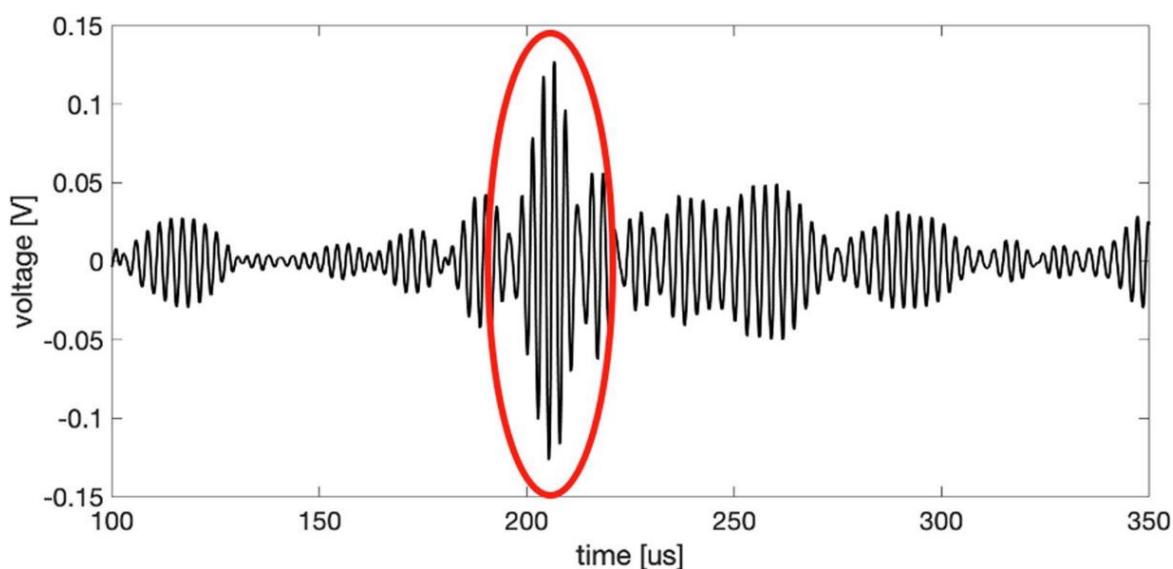


Рисунок 1.4 – Изменение амплитуды пары отражателей при касании с панелью

Работа вычислительной системы, представленной в [23], основана на свойстве поглощения волн Лэмба различными объектами. Такая система включает в себя четыре преобразователя, прикреплённых к краям пластины с помощью токопроводящего клея. Все преобразователи расположены ассиметрично. Одна пара преобразователей используются для излучения волны Лэмба, вторая пара используется в качестве приемника этой волны.

Когда какой-либо объект находится в контакте с сенсорной панелью, на приемники поступает модифицированный вектор распространяющейся волны Лэмба. Этот сигнал поступает на контроллер, где обрабатывается быстрым преобразованием Фурье (БПФ). После обработки полученный сигнал сравнивается по определенным критериям с заранее записанными на этапе проектирования сигналами (шаблонами), находящимися в памяти контроллера. Максимально близкий к записанному сигналу шаблон является предположительным местом касания.

Проведенный анализ показывает, что реализация вычислительных систем для устройств рассмотренного типа требует применение либо специализированных приемников сигналов, либо дополнительного оборудования в виде излучателей и/или отражателей. В этом случае обеспечиваются высокие показатели вандалоустойчивости, однако из-за высокой чувствительности и работы, основанной на регистрации локальных отражений звуковой волны, возможно появление ложных срабатываний, которые приводят к ошибкам функционирования.

Второй тип вычислительных систем рассмотрен в работах [36-48]. Далее проведен анализ наиболее часто реализуемых на практике вычислительных систем указанного типа.

В работе [36] представлена вычислительная, система использующая алгоритм оценки по времени прихода (TDOA) при воздействиях на плоскую твердую поверхность. Этот алгоритм подразумевает представление зарегистрированных сигналов в частотно-временной области. Чтобы минимизировать ошибку из-за дисперсии скорости, для анализа используется только небольшой диапазон частот. Затем преобразованные сигналы оцениваются с использованием эрмитового угла. После чего место касания рассчитывается с помощью применения методов мультилатерации.

Вычислительная система в [37] анализирует распространяющиеся после касания волны в реальном времени для локализации их появления. После получения сигнала подход DST заключается в повторной интеграции

распространенного сигнала путем применения обработки, которая учитывает различия в задержке в зависимости от частоты, а затем применения корреляционной обработки между четырьмя датчиками перед окончательной триангуляцией исходных координат касания. По сути, это форма метода расширенного спектра, которая по своей сути устойчива к отражениям сигнала и помехам. На рисунке 1.5 можно увидеть шаги обработки вычислительной системой зарегистрированных сигналов.

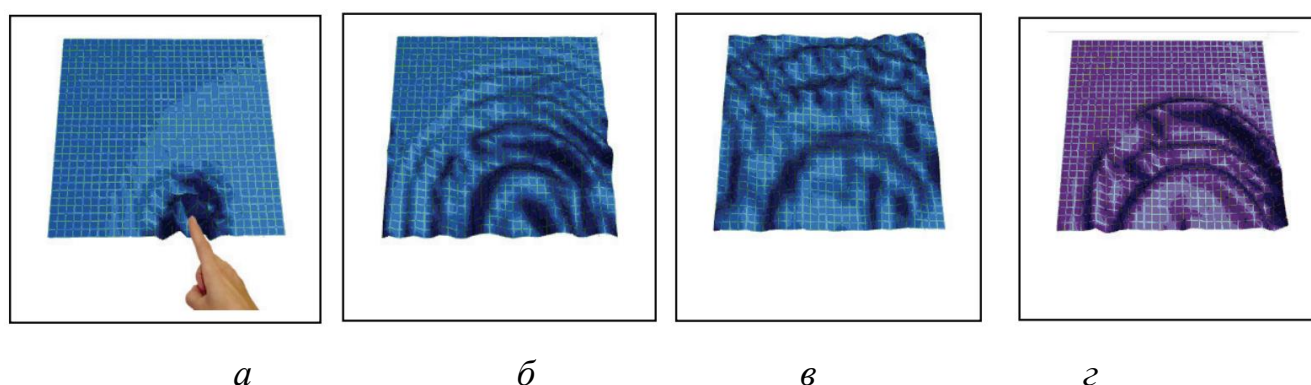


Рисунок 1.5 – Обработка сигналов касания: *а* – начало касания; *б* – распространение волн; *в* – интерференция волн; *г* – обработанный сигнал

Вычислительная система [38], представленная на рисунке 1.6, включает в себя четыре попарно связанных преобразователя, которые улавливают акустические сигналы, образованные касанием, в разных частях поверхности устройства, и преобразуют их в электрическую форму. Далее аналого-цифровой преобразователь на основании анализа этих сигналов генерирует два потока выборок, которые считаются «левым» и «правым» каналами. Затем извлекается информация о разнице фаз каждого из этих каналов в группе по 512 выборок. Эти выборки обрабатываются оконной функцией (Хэмминга), в рамках подготовки к БПФ. Быстрое преобразование Фурье анализирует отсчеты (аудиосэмплы) по 256 частотам и далее в контроллере определяется информация о фазовом угле каждой частотной составляющей. Преобразование Фурье выполняются для «левого» и «правого» каналов, в результате чего получается «левая» и «правая» пара фазовых

углов для каждой из 256 частотных составляющих. Когда каждый из 256 фазовых углов «левого» канала вычитается из соответствующего фазового угла «правого» канала, результатом является график (профиль) информации о разнице фаз, которая связана с местоположением касания.

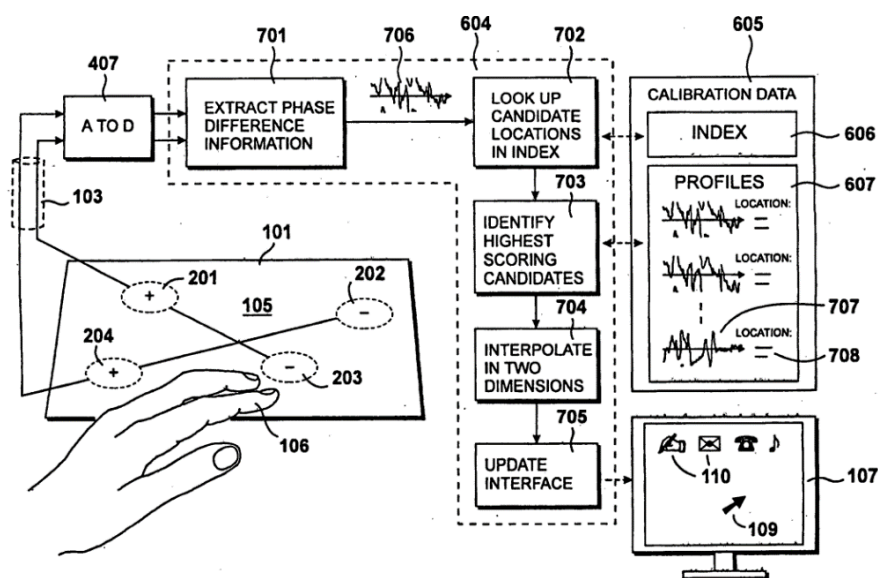


Рисунок 1.6 – Вычислительная система сенсорного устройства локализующая место касания по разнице фаз

Каждое местоположение на поверхности имеет свою собственную уникальную значение разности фаз. Эта уникальность является результатом асимметрии местоположений преобразователей, что гарантирует однозначность локализации места касания.

После извлечения информации о разности фаз из оцифрованных акустических сигналов следующей операцией, выполняемой вычислительной системой сенсорной панели, является поиск возможных местоположений среди записанных индексов (идентификаторов). При выполнении этой операции генерируются возможные местоположения, которые являются подмножеством местоположений из всего набора, для которых хранятся профили. Из этого списка расположений следующим шагом определяется наиболее близкие местоположения. Оценки сходства генерируются для каждого возможного

местоположения, что приводит к идентификации небольшого количества профилей с наибольшим приближением, местоположение которых записаны в памяти. Оценки сходства используются для определения интерполяции между соответствующими местоположениями профиля, чтобы определить центральное местоположение события касания, которое редко совпадает с местоположением калиброванного профиля.

Функционирование вычислительной системы, представленной в [39], начинается с момента регистрации тремя преобразователями звуковой волны. Затем запускается процесс обнаружения значения первого максимального пика сигнала для каждого преобразователя, который превышает определенное заданное пороговое значение. Затем полученные значения используются для поиска коэффициентов Q , которые рассчитываются следующим образом:

$$Q_{12} = \frac{A_1}{A_2}, \quad (1.1)$$

$$Q_{13} = \frac{A_1}{A_3}, \quad (1.2)$$

$$Q_{23} = \frac{A_2}{A_3}, \quad (1.3)$$

где A_1 , A_2 и A_3 – соответствующие значения амплитуд для преобразователей 1, 2, 3.

На основе соотношений Q_{12} , Q_{13} и Q_{23} вычислительная система определяет сигнатуры, представляющие собой набор относительных параметров сигналов, используемых для характеристики положения.

Описанный алгоритм применим для конфигурации с четырьмя регистрирующими устройствами, но его можно обобщить на любую другую конфигурацию, адаптировав различные параметры, например, добавив дополнительный относительный параметр. В общем случае, таким образом, можно получить однозначные сигнатуры для конфигураций с n преобразователями для m активных областей.

Интересно и важно отметить, что система не ищет точную координату касания, а позволяет идентифицировать область, где оно произошло, выделяя его

из ряда глобальных положений на основе сигнатуры соответствующей активной области.

Достоинством систем, обрабатывающих зарегистрированные сигналы без сравнения с шаблонами, является невысокая требовательность к вычислительным ресурсам, в частности, к объему памяти, однако существенным недостатком таких систем является сложность алгоритмов. Достоинством систем, сравнивающих зарегистрированные сигналы с шаблонами сигналов в памяти, является простота реализации алгоритмов, а недостатком – необходимость большого количества памяти. Кроме того, для сравнения полученного сигнала со всеми имеющимися записями требуется продолжительное время, что снижает быстродействие таких систем. Поэтому актуальными являются задачи уменьшения сложности структуры и алгоритмов вычислительных систем с выполнением требований по точности и быстродействию.

1.3. Анализ требований к функционированию акустических сенсорных устройств ввода информации и их вычислительных систем в сложных и специфических условиях эксплуатации

Сенсорные устройства ввода находят применение в разных областях [49]: промышленность, терминалы, оборудование для морского, воздушного и наземного транспорта, кухонные приборы, приборы пожарной безопасности, охранная сигнализация, управление энергетическими установками и т.д. Такая широкая область применения обуславливает одинаковые требования к их функционированию вне зависимости от принципа действия.

Устройства промышленного класса или, как часто их называют, – защищенные устройства, должны выдерживать жесткие условия эксплуатации [50, 51]. Для этого при разработке инженеры-конструкторы должны учитывать четыре важных аспекта проектирования, изготовления и эксплуатации устройств и их вычислительных систем: выбор компонентов и материалов, методы и алгоритмы локализации места касания, климатические условия эксплуатации, защита от

вредных воздействий. К оценке части параметров применяется стандарт IPXX [52] где первый X показывает уровень защиты от попадания твердых предметов, а второй – уровень защиты от жидкостей, и стандарт IKXX [53], где XX указывает на степень защиты от вредных внешних механических воздействий.

Стоит учитывать, что при использовании устройств ввода вне помещений происходит постоянное воздействие прямых солнечных лучей, что со временем может привести к их значительному повреждению. Обычно для ИК-защиты на устройства наносится специальная пленка, служащая барьером, блокирующим вредное инфракрасное излучение.

Немаловажным фактором являются и локальные условия применения устройств ввода, к примеру – пищевое производство [54]. Основная проблема такой среды применения заключается в том, что в условиях пищевого производства на сенсорную поверхность могут попадать жидкие отходы и скапливаться конденсат. Помимо этого, гигиенические нормы пищевого производства [55] предполагают работу операторов в перчатках. И, наконец, в цехах пищевых комбинатов не применяется оборудование, содержащее стеклянные элементы. В случае повреждения стекла, которое является поверхностью сенсорного устройства, всю партию продукта пришлось бы утилизировать из-за малейшей вероятности попадания осколков в пищевые продукты.

Обобщая, можно выделить следующие требования к устройствам ввода и их вычислительным системам, предназначенным для функционирования в сложных и специфических условиях эксплуатации:

- гибкость в установке, габариты и материал устройства. Устройства могут быть установлены на панели оборудования, встраиваться в корпуса станков или крепиться на специальных кронштейнах, что позволяет интегрировать их в любые производственные процессы и системы управления;

- интерактивность и простота управления и обслуживания. Сенсорные панели должны обеспечивать удобное управление процессами без необходимости использования мыши или клавиатуры. Это особенно важно в условиях

производства, где скорость и простота взаимодействия с системой имеют критическое значение;

- широкий диапазон рабочих температур. Промышленные устройства и их вычислительные системы должны работать при экстремально низких и высоких температурах;

- совместимость с промышленными системами. Должна быть поддержка широких спектров интерфейсов для подключения к управляемым системам, серверам и другим устройствам, обеспечивая стабильное взаимодействие с промышленным оборудованием;

- высокая прочность поверхности экрана. Устройство и ее вычислительная система должна быть стойкой к механическим воздействиям, которые могут возникнуть в нештатной ситуации;

- способность определения сигналов срабатывания. Вычислительная система должна четко различать истинное касание от ложных взаимодействий, к примеру, попадания воды на рабочую поверхность устройствах или же использование устройства в перчатках;

- долговечность. Сенсорные устройства и их системы должны быть устойчивыми к износу и быть долговечными, чтобы выдерживать многократные касания и длительное использование;

- точность и скорость распознавания касания. Параметр, от которого зависит правильность функционирования системы в которой применяется устройство;

- устойчивость к механическим воздействиям. Сенсорные устройства должны быть защищены от механических повреждений, включая удары, падения и вибрации, особенно если они используются в промышленных условиях.

1.4. Математическая постановка задачи диссертационного исследования

Исходя из предъявляемых требований к функционированию акустических сенсорных устройств введем показатели их вычислительных систем: точность локализации R (мм), быстродействие Q (итерации расчета), надежность P (%). Для

оценки этих показателей используется сравнение с требуемыми (R_T , Q_T , P_T) по техническим условиям. Используем следующие параметры устройств ввода и их вычислительных систем:

- характеристики применяемых регистрирующих устройств N (количество, ед; место расположения, (мм, мм, мм));
- габаритные размеры S (длина, ширина, высота, мм);
- свойства материала сенсорной основы M (модуль Юнга, Па; коэффициент Пуассона; плотность, кг/м³);
- параметры микроконтроллера G (тактовая частота, Гц; разрядность, ед.);
- параметры АЦП B (частота дискретизации, Гц; разрядность, ед.);

На основе введенных показателей и параметров получим следующие зависимости:

$$R = f(N, S, G, B), R > R_T, \quad (1.4)$$

$$Q = f(N, S, M, G, B), Q > Q_T, \quad (1.5)$$

$$P = f(S, M, G, B), P > P_T. \quad (1.6)$$

Сформулируем постановку основных задач на основании построенных зависимостей

1. Выбрать значимые параметры для оценки модели.
2. Определить наличие дополнительных параметров.
3. Разработать способ идентификации звуковых волн, имеющий максимальные значения по всем показателям.
4. Разработать модели позиционирования точки касания, позволяющую гибко использовать каждый параметр для максимизации каждого показателя под заданные условия.
5. Создать метод разработки вычислительных систем, дающий возможность эффективно использовать каждый показатель и параметр.

1.5. Выводы по главе

Глава посвящена обзору и анализу различных вариантов реализации устройств ввода информации, а также их вычислительных систем и требований, выдвигаемых при их разработке и эксплуатации. Рассмотрены различные группы сенсорных устройств ввода по физическому принципу действия с описанием их достоинств и недостатков. Проведен анализ акустических сенсорных устройств ввода и их вычислительных систем, включая описание и ключевые характеристики. Проанализированы требования, выдвигаемые к акустическим сенсорным устройствам ввода информации и их вычислительным системам. На основании этих требований сформулирована математическая постановка задачи диссертационного исследования, которая должна обеспечить создание вычислительной системы, предназначенной для функционирования в сложных условиях эксплуатации. Определены задачи для достижения этой цели.

2. Разработка и исследование способа локализации источника звука вычислительной системой акустического сенсорного устройства ввода информации

2.1. Обзор и анализ способов локализации источника звука

Локализация источника звука с небольшим объемом данных является сложной задачей. Для решения этой проблемы предложено множество способов [56-67]. При этом большинство из них предназначены для локализации источника звука в таких средах, как жидкость или газы, однако для реализации предложенного устройства ввода и его вычислительной системы необходима локализация в твердых телах. Помимо перечисленных в предыдущей главе, существуют следующие способы локализации источника звука.

Способ локализации источника звука, основанный на теории компрессионного зондирования [68]. Для каждого микрофона строится основа разреженности путем сдвига аудио сигнала, записанного с одного опорного микрофона. Таким образом, микрофонам, за исключением опорного, разрешается захватывать аудио сигналы с частотой дискретизации намного ниже критерия Найквиста-Котельникова. Затем позиции источников оцениваются путем решения задачи минимизации [69], на основе каждого кадра аудио сигналов.

Способ локализации источника звука с использованием пьезоэлектрических акустических мета поверхностей [70]. Акустическая метаповерхность, состоит из Гельмгольца-подобной резонансной полости и пьезоэлектрического композитного листа в воздухе. Эта структура определяет ориентацию звукового поля и локализует источник звука с использованием алгоритма моделирования и оптимизации методом конечных элементов.

Способ взвешенной неотрицательной матричной факторизации с использованием оценки широкополосной мощности управляемого отклика [71]. В этом подходе разлагается спектр сигнала на взвешенную сумму широкополосных спектральных компонентов, называемыми атомами, а затем использует

разреженность сигнала в представлении временных атомов для локализации. Разложение на атомы выполняется сразу по приходу сигнала с использованием неотрицательной матричной факторизации краткосрочных амплитудных спектров, а оценка локализации получается с помощью подхода широкополосной управляемой мощности отклика для каждого активного атома временного кадра.

Предлагаемые в работах способы локализации основываются на:

- использовании микрофонных массивов, включающих в себя от 5 до 40 регистрирующих устройств в одной точке;
- применении специальных регистрирующих устройств, разработанных для функционирования в конкретных системах;
- хранении записанных ранее шаблонов сигналов и их сопоставление;
- анализе полной формы сигнала;
- использовании дополнительного оборудования.

Для реализации вычислительной системы акустического устройства ввода с ограниченными ресурсами такие способы затруднительно использовать в связи с чем, в настоящей главе раскрывается способ локализации, использующий минимально возможное количество регистрирующих устройств и позволяющий локализовать место касания с минимальным набором данных.

2.2. Анализ распространения звука в твердых не криволинейных телах и его возможная локализация

Понятие звука можно рассмотреть с двух разных точек зрения [72].

С точки зрения физиологии звук – это уникальное ощущение, которое возникает в результате воздействия звуковых волн, распространяющихся в воздухе, на слуховой орган.

С точки зрения физики звук представляет собой волнообразные колебания частиц упругой среды. Иными словами, звук возникает в результате

колебательного процесса, который распространяется в упругой среде. В дальнейшем будет использоваться именно это понятие.

При взаимодействии пользователя с основой сенсорного экрана происходит касание, а это, в свою очередь, кратковременное взаимодействие объектов, в результате которого происходит перераспределение кинетической энергии, создающее ударную волну. Пусть с плоской панелью с площадью S и плотностью ρ , находящейся в состоянии покоя, с силой F сталкивается другой объект. За время Δt под действием силы F панель будет деформироваться, что приведет к ее перемещению от начального положения на расстояние ΔL . При деформации происходит смещение атомов кристаллической решетки материала панели, которое передается от атома к атому со скоростью V (рисунок 2.1). Для нахождения скорости V используем второй закон Ньютона и получим следующее уравнение [73, 74]:

$$F\Delta t = \frac{\rho S L \Delta L}{\Delta t}, \quad (2.1)$$

где L – упругая деформация панели, м. Разделим обе части уравнения на $S\Delta t$, умножим числитель и знаменатель правой части на L , заменим F на $F_{\text{упр.}}$:

$$\sigma = \rho \left(\frac{L}{\Delta t}\right)^2 \frac{\Delta L}{L} = k \frac{\Delta L}{L}, \quad (2.2)$$

где σ – напряжение, возникающее при упругой деформации. Из этого уравнения получаем выражение скорости распространения звука в твердом материале:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho(2(1+\nu))}}, \quad (2.3)$$

где E – модуль Юнга, Па; ν – коэффициент Пуассона.

Таким образом, скорость распространения звуковой волны V зависит от плотности, коэффициента Пуассона и модуля Юнга (иными словами, от свойств

материала) и не зависит от силы касания. Сила касания, в свою очередь, будет влиять на дальность смещения атомов, что является амплитудой звуковой волны.

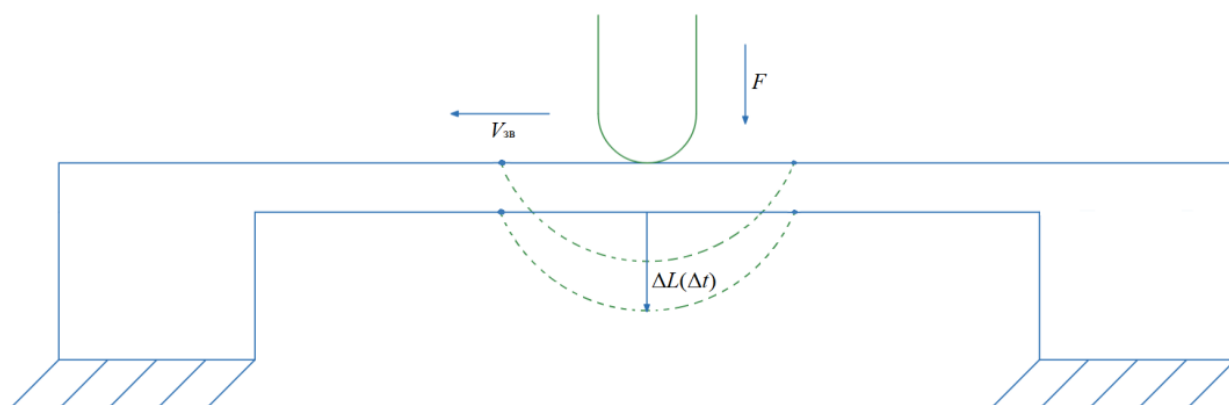


Рисунок 2.1 – Представление смещения атомов кристаллической решетки материала панели при касании

На скорость звука также влияют и внешние факторы, такие как: напряжение или температура окружающей среды [75]. Влияние напряжения объясняется тем, что при его воздействии на материал, в котором протекают звуковые процессы, меняется его плотность, что приводит к увеличению или уменьшению скорости звука. Температура, в свою очередь влияет не только на плотность, но и на модуль упругости.

Локализовать звук можно с помощью устройств регистрации звука, использующих пьезоэлектрические кристаллы, например, пьезоэлектрических преобразователей (микрофонов). Особенность их применения заключается в том, что благодаря передающим характеристикам твердых тел колебания, вызванные при касании, передаются и на регистрирующие устройства. В свою очередь, эти колебания представляют собой механическое напряжение, и при его воздействии на пьезоэлектрический кристалл напряжение механическое преобразуется в электрическое (прямой пьезоэффект), значение которого пропорционально силе механического воздействия [76]:

$$U = S_d F_x, \quad (2.4)$$

где S_d – чувствительность преобразователя; F_x – усилие, направленное вдоль электрической оси.

Другой особенностью использования пьезоэлектрических преобразователей является, возможность измерения быстро протекающих процессов. В частности, их рабочий диапазон частот составляет от 0,1 Гц до 20 кГц, а амплитудная характеристика линейна в динамическом диапазоне до 120 дБ.

2.3. Описание предложенного способа локализации места касания

Для определения местоположения звука на поверхности достаточно иметь информацию о его скорости распространения и координатах точек, где он был зафиксирован. Используя самые первые колебания, полученные регистрирующими устройствами, можно получить время регистрации звуковой волны t_i (для $i = 1, 2, 3$). Имея эти данные, определим расстояние S_i от места касания до приемника следующим образом:

$$S_i = V(t_i - t_0), \quad (2.5)$$

где V – скорость звука; t_0 – неизвестное время начала касания. Зная все расстояния от точки касания до как минимум трех регистрирующих устройств, можно локализовать эту точку (рисунок 2.2). Таким образом, для локализации места касания в предлагаемом способе необходима небольшая часть зарегистрированного сигнала (первый экстремум), а по полученным данным можно найти значение неизвестных S_i и t_0 .

Использование микрофонов в количестве от трех штук объясняется тем, что при меньшем их количестве локализовать источник звука не получится. При использовании 1 регистрирующего устройства получится бесконечно много ложных точек касания, находящихся на расстоянии S_1 , как показано на рисунке 2.3,а. При использовании двух регистрирующих устройств количество ложных точек касания сокращается до 1, так как количество комбинаций расстояний S_1 и S_2

сокращается до двух, как показано на рисунке 2.3,б, что, в любом случае, является недопустимым для однозначной локализации точки касания.

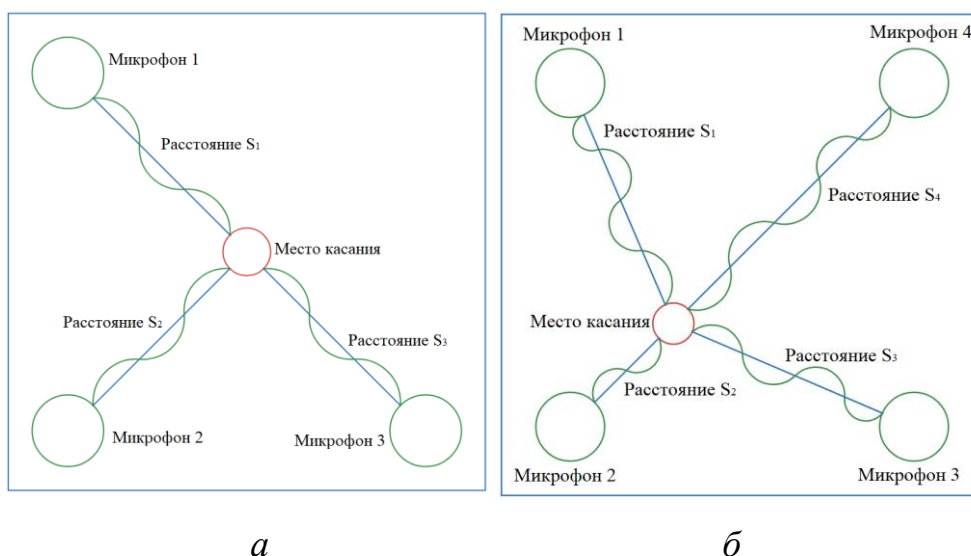


Рисунок 2.2 – Локализация акустического сигнала: *a* – с 3 регистрирующими устройствами; *б* – с 4 регистрирующими устройствами

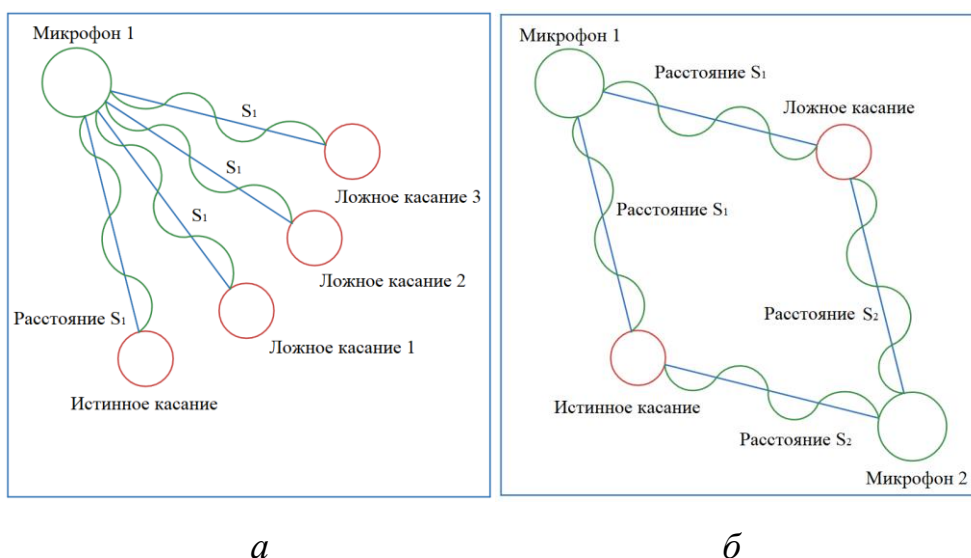


Рисунок 2.3 – Локализация акустического сигнала: *a* – с одним регистрирующим устройством; *б* – с двумя регистрирующими устройствами

При решении задачи локализации с имеющимся набором данных (время фиксации первых экстремумов зарегистрированных сигналов, скорость их распространения в материале, расположение регистрирующих устройств)

применение «классических» методов локализации – триангуляции или трилатерации, становится невозможным.

Для использования метода триангуляции необходимо иметь постоянный или часто повторяющийся сигнал излучения и приемники с возможностью сканирования заданного сектора, чтобы определить направление на источник сигнала относительно приемников [77-79]. Вычислив сектор направления и используя тригонометрию, можно рассчитать зону, в которой находится источник, как показано на рисунке 2.4,*а*. Однако в предлагаемом устройстве излучаемый сигнал генерируется при касании однократно, а его направление нельзя определить, используя малое количество регистрирующих устройств.

Трилатерация, изображенная на рисунке 2.4,*б*, использует известные расстояния как минимум от трех фиксированных точек в двумерном пространстве или четырех фиксированных точек в трехмерном пространстве для расчета положения источника сигнала, определяя точку положения, находя пересечение ряда окружностей (аналогично диаграмме Венна) [80-82].

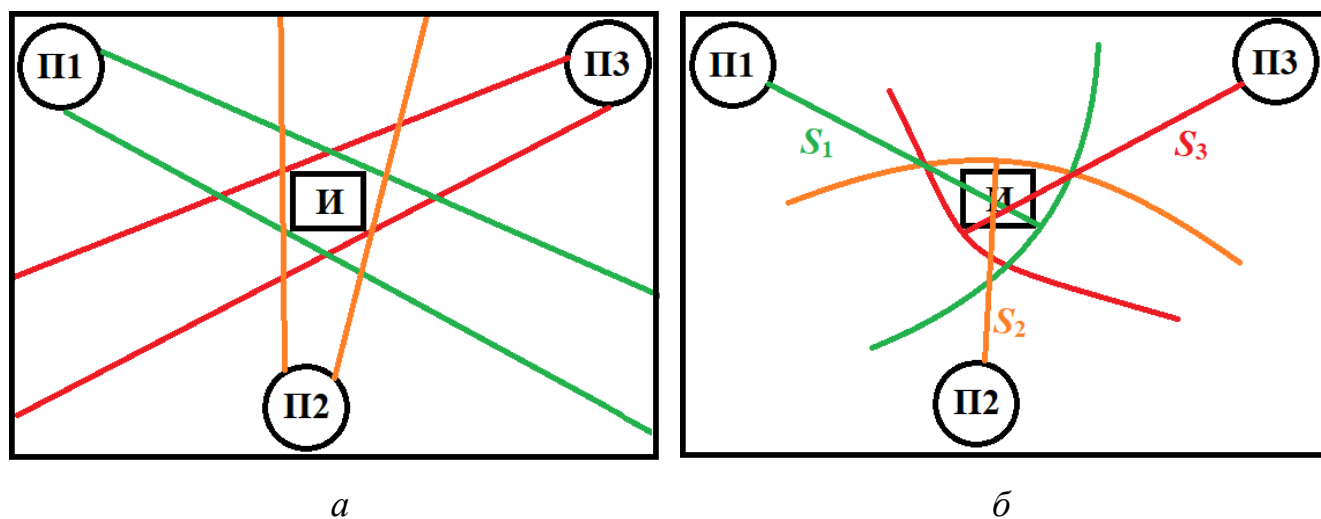


Рисунок 2.4 – Методы локализации: *а* – триангуляция; *б* – трилатерация

Для применения метода трилатерации необходимо иметь данные о времени начала сигнала излучения. Например, мобильное устройство отправляет сигнал с меткой времени t_0 , которая становится известной базовым станциям (БС) сотовой

связи. БС измеряют временной интервал между отправкой сигнала мобильным устройством и его получением. Используя эту разницу, рассчитывается расстояние S , которое прошел сигнал. С помощью как минимум трех расстояний локализуется источник излучения. В предлагаемом устройстве и способе локализации время t_0 является неизвестной величиной, что делает метод трилатерации неприменимым.

2.4. Разработка и исследование программной модели для анализа распространения звуковой волны по поверхности экрана и локализации источника звука в среде моделирования Comsol

Для оценки адекватности предлагаемого способа локализации места касания вычислительной системой была разработана программная модель распространения звуковых сигналов в сенсорном экране устройства. Моделирование системы выполнено с помощью программы COMSOL Multiphysics 6.1.

Обоснование выбора среды моделирования [83-86]:

- большое количество встроенных библиотек с разными материалами;
- доступная информация об уравнениях, описывающих процессы и краевых условиях в явном виде;
- возможность добавления собственных уравнений и условий;
- автоматическое задание уравнений при выборе модуля.

Для моделирования распространения колебаний, вызванных касанием, был выбран модуль физики «Solid Mechanics», входящий в состав модуля «Acoustics». Интерфейс механики твердого тела предназначен для общего структурного анализа 3D моделей. Он основан на уравнениях Навье, которые позволяют определить перемещения, напряжения и деформаций. Заложенные в модуле уравнения, используемые в исследуемой модели, показаны на рисунке 2.5.

Для модели было принято, что панель устройства представляет собой конструкцию с габаритными размерами 200 мм × 200 мм × 4 мм (длина, ширина, высота), установленную на четырех жестко зафиксированных опорах. К внутренней части этой панели прикреплены три регистрирующих устройства M (1,

2, 3 на рисунке 2.6), а точка касания D , для наглядности, показана под номером 4. Координаты регистрирующих устройств 1, 2, 3 – M_1 (40; 20; 0), M_2 (160; 20; 0), M_3 (40; 180; 0), соответственно. Область для касаний выделена прямоугольником.

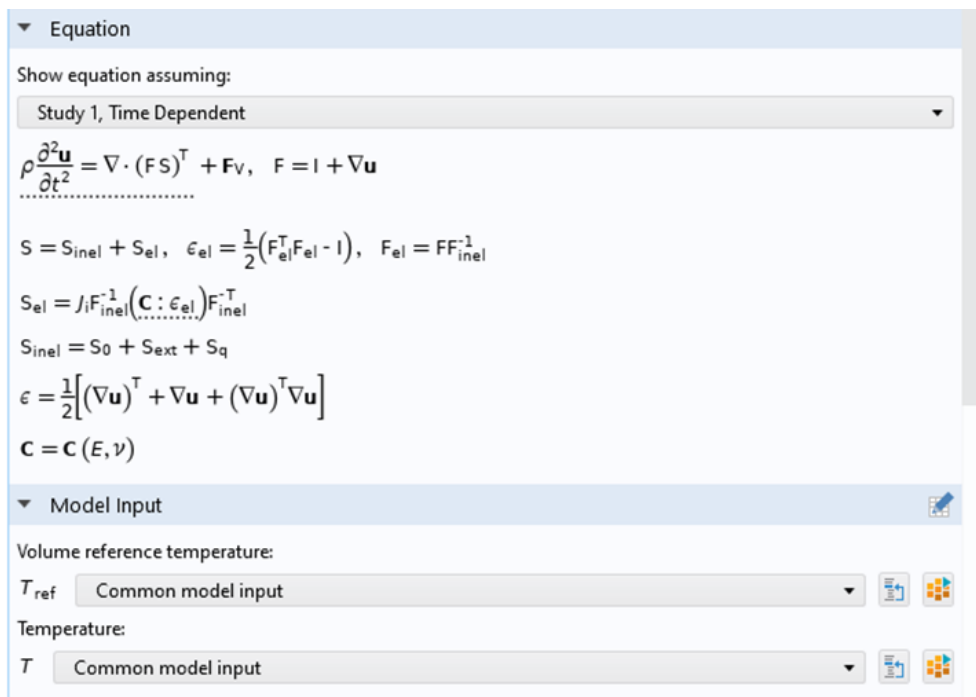


Рисунок 2.5 – Уравнения решателя Comsol

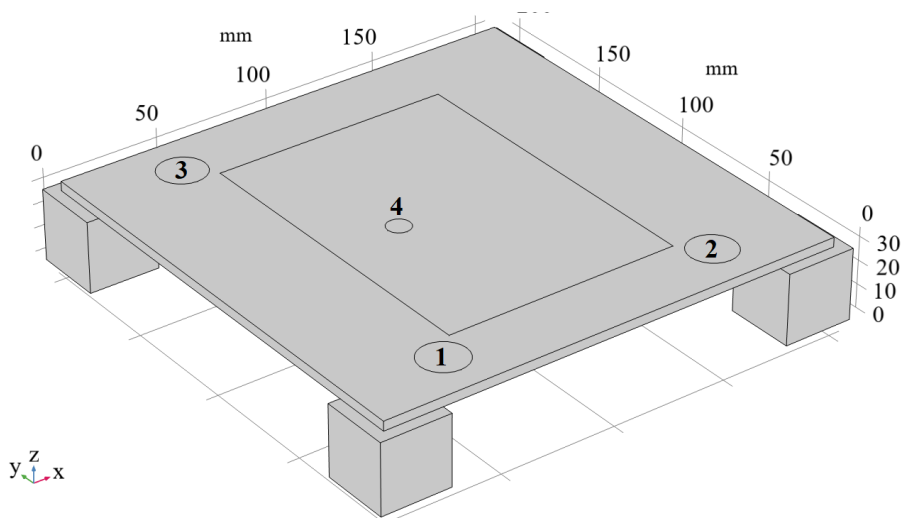


Рисунок 2.6 – Модель сенсорного устройства

Для моделирования использовалась безэховая среда, температура окружающей среды задана как $T = 293.15 \text{ K}$, а касания проводились в точках D_1

(100; 100; 4), D_2 (120; 140; 4), D_3 (150; 100; 4). Задаваемые физические параметры материала панели показаны на рисунке 2.7, в качестве исходного материала была выбрана сталь.

»	Property	Variable	Value	Unit
⚠	Tangent coefficient of thermal expansion	alphatan_iso ; alphatanii = alphatan_iso, alphatanij = 0		1/K
☑	Density	rho	rho(T)	kg/m ³
☑	Young's modulus	E	E(T)	Pa
☑	Poisson's ratio	nu	nu(T)	1
	Coefficient of thermal expansion	alpha_iso ; alphasii = alpha_iso, alphasij = 0	(alpha(T)+(Tempref-293[K])*if...	1/K
	Thermal strain	dL_iso ; dLii = dL_iso, dLij = 0	(dL(T)-dL(Tempref))/(1+dL(Te...	1
	Bulk modulus	K	kappa(T)	N/m ²
	Shear modulus	G	mu(T)	N/m ²

Рисунок 2.7 – Физические параметры материала панели

В качестве воздействия использовалось одиночное касание в разных точках, время начала касания, его длительности, пика и силы составляли $t_0 = 3$ мкс, $t_{\text{кас}} = 6$ мкс, $t_{F\text{макс}} = 6$ мкс, $F = 10$ кПа соответственно (рисунок 2.8).

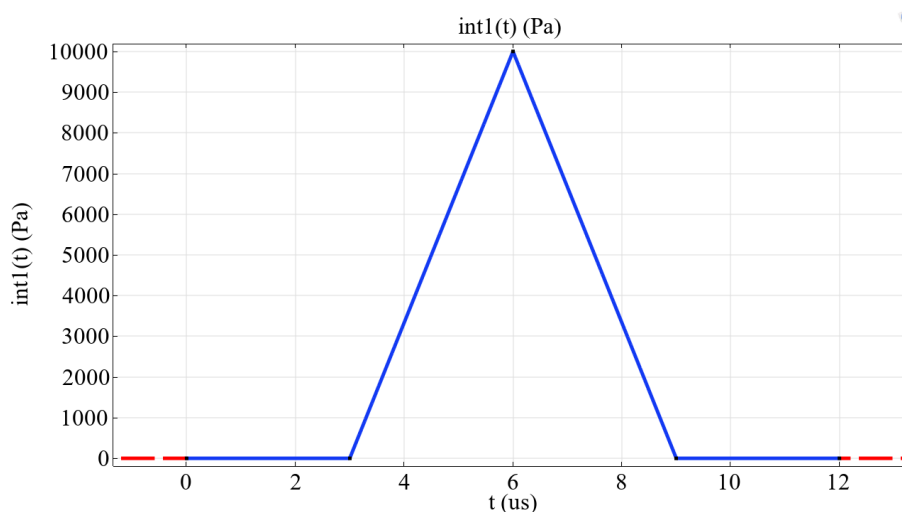


Рисунок 2.8 – Параметры касания

Для того, чтобы добиться максимально равномерной картины распространения колебаний, вызванных касанием, для модели была создана сетка, состоящая из 18000 элементов, равноудаленных друг от друга, как показано на рисунке 2.9.

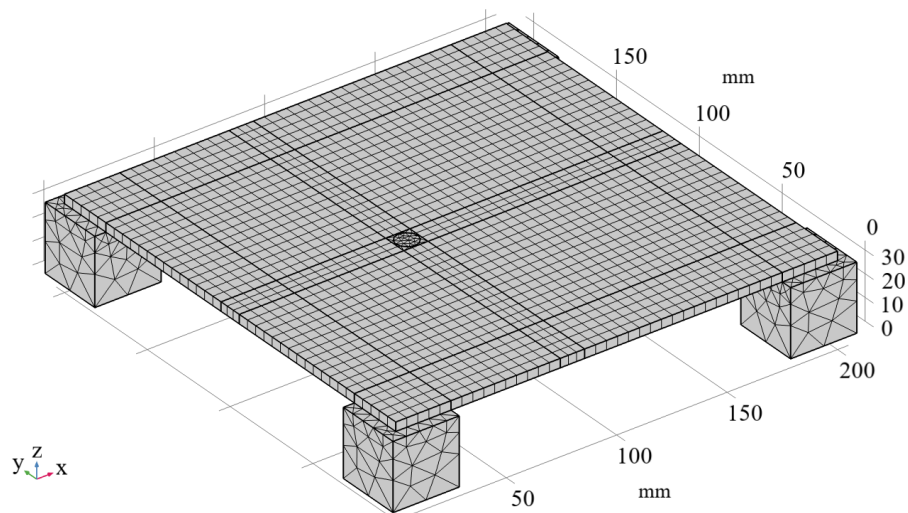


Рисунок 2.9 – Настройка сетки модели

Распространение колебаний можно увидеть на рисунке 2.10,*а*, отражение колебаний от стенок панели показаны на рисунке 2.10,*б*, а конечный результат многократных отражений колебаний продемонстрирован на рисунке 2.10,*в*.

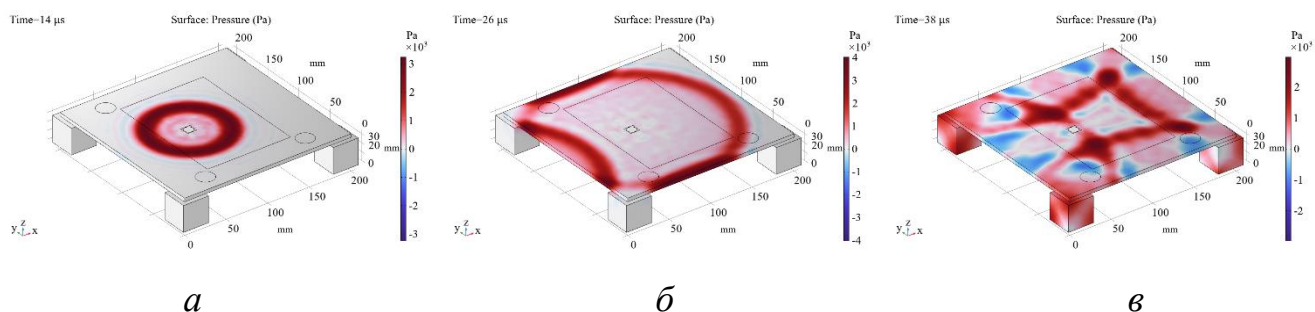
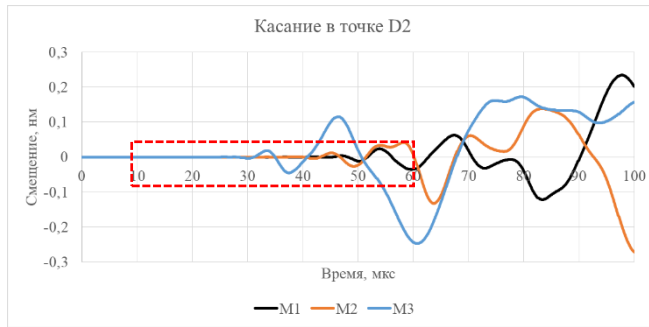


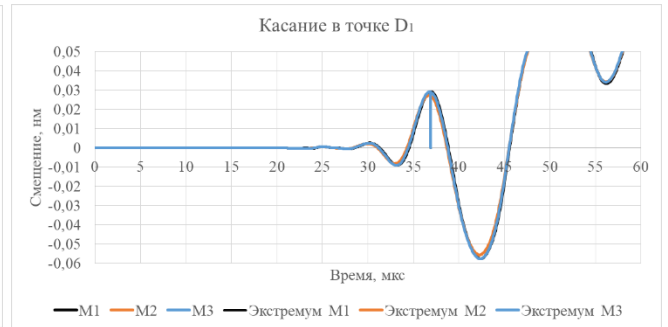
Рисунок 2.10 – Распространение колебаний в панели сенсорного устройства: *а* – начало; *б* – отражение; *в* – сумма колебаний

На рисунке 2.11 отражены колебания, зарегистрированные в точках M_1 , M_2 и M_3 после касания в точках D_1 , D_2 и D_3 . Как видно из рисунка 2.11,*а*, зарегистрированный сигнал имеет сложную форму. Однако, из полученных графиков значимым является время первого экстремума, так как последующие значения экстремумов относятся к колебаниям, отраженным от границ панели. Моменты времени регистрации максимального значения микрофонами 1, 2 и 3 при

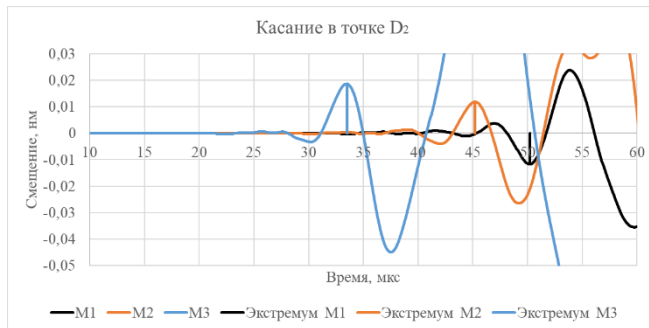
касании в точке: D_1 ($t_1 = 36,9$ мкс, $t_2 = 36,9$ мкс, $t_3 = 36,9$ мкс); D_2 ($t_1 = 50,2$ мкс, $t_2 = 45,2$ мкс, $t_3 = 33,5$ мкс); D_3 ($t_1 = 47,6$ мкс, $t_2 = 30,6$ мкс, $t_3 = 47,6$ мкс).



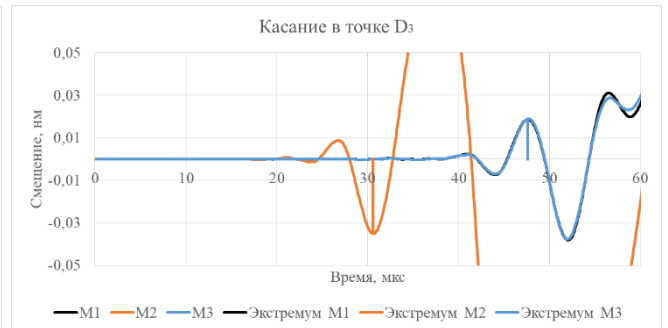
a



б



в



г

Рисунок 2.11 – Сигналы с регистрирующих устройств M_1 , M_2 и M_3 : *a* – полное представление сигналов после касания в точке D_3 ; *б* – первый экстремум после касания в D_1 ; *в* – первый экстремум после касания в D_2 ; *г* – первый экстремум после касания в D_3

Вычтя из полученных значений времени регистрации колебаний t_i значение $t_{F\text{макс}}$, подставив полученную разницу в формулу (2.5) и используя скорость звука $V = 3248,50$ м/с, получим следующие значения расстояний от регистрирующих устройств до места касания в точке: D_1 ($S_1 = 100,38$ мм, $S_2 = 100,38$ мм, $S_3 = 100,38$ мм); D_2 ($S_1 = 143,58$ мм, $S_2 = 127,34$ мм, $S_3 = 89,33$ мм); D_3 ($S_1 = 135,14$ мм, $S_2 = 79,91$ мм, $S_3 = 135,14$ мм). В свою очередь, расчетные значения расстояний следующие: D_1 ($S_1 = 100,08$ мм, $S_2 = 100,08$ мм, $S_3 = 100,08$ мм); D_2 ($S_1 = 144,28$ мм, $S_2 = 126,55$ мм, $S_3 = 89,53$ мм); D_3 ($S_1 = 136,07$ мм, $S_2 = 80,72$ мм, $S_3 = 136,07$ мм). Оценка

полученных результатов проведена с использованием χ^2 (Пирсона) и приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Оценка результатов моделирования

Параметр	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
Максимальная абсолютная погрешность, мм	0,3	0,79	0,94
Максимальная относительная погрешность, %	0,002	0,006	0,006
Сумма $\chi^2_{\text{Эмп}}$	0,001	0,004	0,004
Уровень значимости, %	95	95	95

Результаты моделирования удовлетворяют расчетным, согласно критерию Пирсона. Имеющуюся небольшую расхожимость в расстояниях можно объяснить тем, что при моделировании сетка модели была средних размеров, а расчеты в самой программе выполняются с помощью численных методов. При этом увеличение элементов в сетке модели ведет к увеличению продолжительности вычислений, которое не гарантирует 100% совпадение результатов аналитического и имитационного (программного) моделирования.

2.5. Экспериментальное исследование предложенного способа локализации места касания на разработанном опытном образце

Для оценки адекватности построенной компьютерной модели и предложенного способа было проведено экспериментальное исследование на макете устройства (рисунок 2.12). Его параметры полностью соответствовали параметрам модели за исключением того, что регистрирующие устройства были приклеены с помощью специального воска, а также окружающая среда не является безэховой.

Координаты касания D_1 , D_2 и D_3 и расположения регистрирующих устройств M_1 , M_2 и M_3 использовались те же, что и при моделировании. На рисунке 2.13

проиллюстрированы зарегистрированные колебания. В частности, из рисунка 2.13, а можно отметить, что сигнал имеет такую же сложную форму, как было показано ранее. Время пика касания и регистрации первого экстремума всеми регистрирующими устройствами в разных точках касания следующие: D_1 ($t_0 = 69$ мкс, $t_1 = 119,3$ мкс, $t_2 = 118,7$ мкс, $t_3 = 119,4$ мкс); D_2 ($t_0 = 178$ мкс, $t_1 = 248,6$ мкс, $t_2 = 240$ мкс, $t_3 = 223,3$ мкс); D_3 ($t_0 = 199$ мкс, $t_1 = 267,6$ мкс, $t_2 = 240,68$ мкс, $t_3 = 266,26$ мкс).

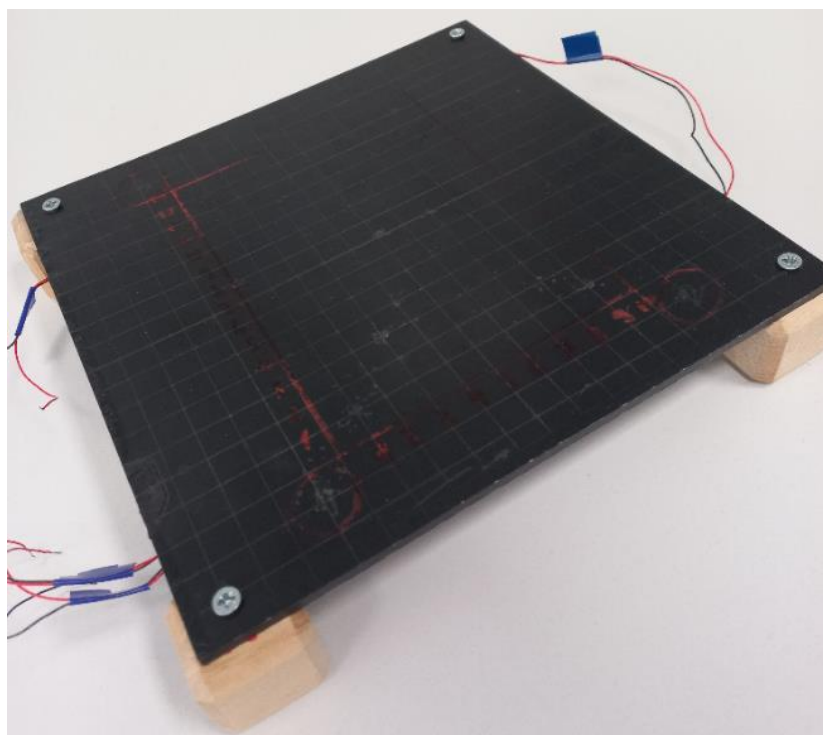
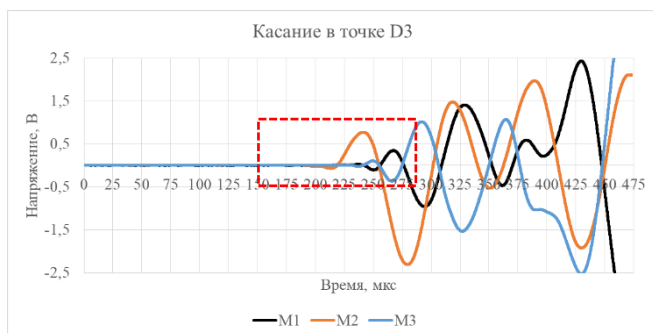
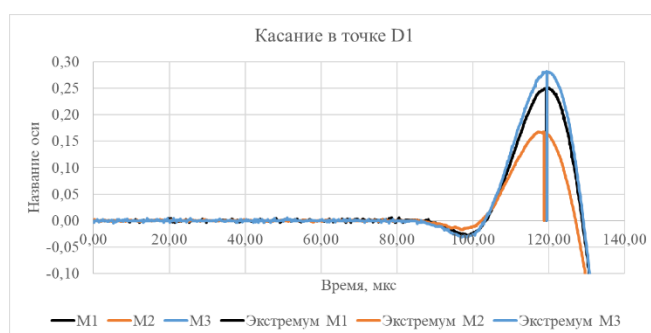


Рисунок 2.12 – Макет устройства

Выполнив те же расчеты, что и в предыдущем параграфе, используя скорость звука в материале физического образца $V \approx 2000$ м/с, найдем значения расстояний от регистрирующих устройств до места касания в точке: D_1 ($S_1 = 100,6$ мм, $S_2 = 99,4$ мм, $S_3 = 100,8$ мм); D_2 ($S_1 = 140,8$ мм, $S_2 = 123,6$ мм, $S_3 = 90,2$ мм); D_3 ($S_1 = 136,89$ мм, $S_2 = 83,05$ мм, $S_3 = 134,21$ мм). Оценка полученных результатов проведена с использованием критерия χ^2 и приведена в таблице 2.2.



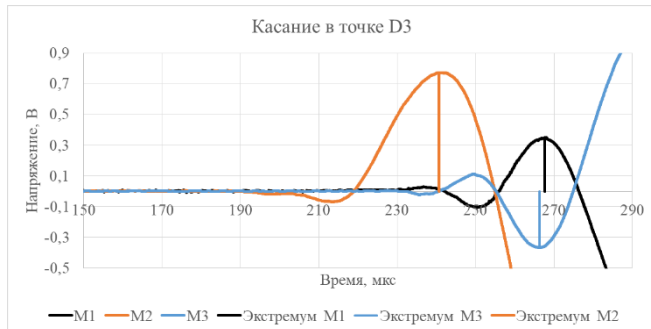
a



б



в



г

Рисунок 2.13 – Сигналы с регистрирующих устройств M_1 , M_2 и M_3 : *a* – полное представление сигнала после касания в точке D_3 ; *б* – первый экстремум после касания в D_1 ; *в* – первый экстремум после касания в D_2 ; *г* – первый экстремум после касания в D_3

Таблица 2.2 – Оценка экспериментальных результатов

Параметр	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
Максимальная абсолютная погрешность, мм	0,68	3,48	2,33
Максимальная относительная погрешность, %	0,006	0,024	0,028
Сумма $\chi^2_{\text{Эмп}}$	0,006	0,033	0,046
Уровень значимости, %	95	95	95

Значения расстояний, полученные в результате экспериментов на физической модели (макете), идентичны компьютерной модели и несущественно отличаются от расчетных. Разницу в отличии графиков физической и компьютерной моделей можно объяснить тем, что материал крепления регистрирующих устройств имеет свой коэффициент передачи колебаний,

связанный с его физическими характеристиками (плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона). Разница между расчетными и полученными значениями связана с физическими и габаритными параметрами стальной пластины. В реальных условиях добиться идеальной ровности и равномерного распределения свойств материала практически невозможно, что приводит к имеющимся отличиям результатов моделирования.

2.6. Выводы по главе

В данной главе рассмотрены различные способы локализации источника звука на поверхности сенсорного устройства ввода. В процессе анализа выделены как достоинства, так и недостатки каждого из рассмотренных подходов.

Предложен новый способ локализации места возникновения колебаний на сенсорной основе, вызванных касанием. Этот метод основывается на принципе, что для определения местоположения касания достаточно иметь информацию о скорости распространения колебаний, местоположении регистрирующих устройств и времени первого экстремума зарегистрированных колебаний. Такой подход позволяет значительно упростить процесс локализации и повысить его быстродействие и снизить вычислительную сложность, что является важным аспектом при разработке высокоэффективных вычислительных систем сенсорных устройств ввода информации.

Для проверки предложенного способа было проведено компьютерное моделирование распространения колебаний по сенсорной основе устройства. Полученные результаты моделирования были сравнены с расчетными данными и, согласно критерию Пирсона, результаты находятся в зоне значимости. Это подтверждает надежность и точность предложенного метода локализации.

Дополнительно было проведено экспериментальное исследование распространения колебаний на макете акустического сенсорного устройства ввода информации. Результаты экспериментального исследования также были проверены на значимость по критерию Пирсона, согласно которому они также

находятся в этой зоне. Это подтверждает, что предложенный способ к локализации колебаний является не только теоретически обоснованным, но и практически применимым.

3. Разработка и исследование математических и программных моделей определения местоположения точки касания вычислительной системой акустических сенсорных устройств ввода информации

3.1. Анализ математических моделей, методов и алгоритмов определения местоположения точки касания сенсорных устройств

Вопросами разработки математических моделей определения места касания вычислительной системой в акустических устройствах ввода информации посвящены работы российских и зарубежных ученых [87-94]. Часто применяемые методы локализации рассмотрены в следующих работах.

Вычислительная система сенсорного акустического устройства, использующая пьезоэлектрические полимеры поливинилиденфторида (ПВДФ) в бета-фазе для распознавания акустических импульсов [41]. Для функционирования этой системы преобразователи в количестве четырех штук расположены по краям панели, как показано на рисунке 3.1 для приема акустических импульсов, генерируемых прикосновениями. Каждый преобразователь подключен к считывающей электронной схеме системы, состоящей из дифференциального усилителя заряда, компаратора и полосового фильтра, а выход этой схемы подключен к микроконтроллеру. В микроконтроллере производятся расчеты для определения местоположения прикосновения на основе временных разниц сигналов:

$$x = \frac{l - tv}{2}, \quad (3.1)$$

где l – длина пластины, м; t – разница во времени между прибытием двух противоположных сигналов (может быть положительной или отрицательной), с; v – скорость звука в материале, м/с. Например, для $l = 0,25$, $t = -0,0006$ с и $v = 3000$ м/с уравнение (3.1) дает результат 0,215 м, то есть касание произошло на

расстоянии 0,035 м от правого датчика, что приблизительно равно фактическому расстоянию касания равному 0,04 м от правого датчика.

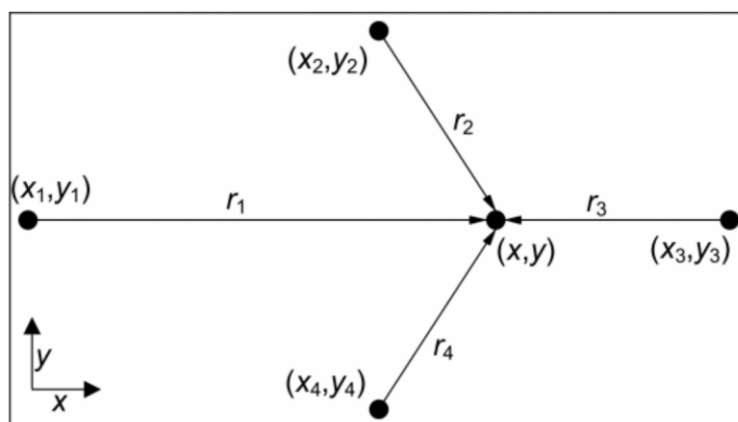


Рисунок 3.1 – Расположение датчиков для локализации места касания и графический принцип локализации места касания

Вычислительная система сенсорного акустического устройства на основе взаимодействия ультразвуковых направленных волн с контактным импедансом [27]. Для локализации места касания эта вычислительная система использует отражения и передачу направленной звуковой волны, вызванной присутствием объекта на поверхности экрана.

Принцип работы этой вычислительной системы заключается в отправке ультразвуковой направленной волны в приемники и измерении ее отражения в разных местах, как показано на рисунке 3.2. При отсутствии контакта наблюдаются отражения, вызванные краями. Однако при наличии контакта инициируется локальное отражение, которое изменяет измеренное поле колебаний. Идея заключается в том, чтобы затем сравнить измеренный отклик на датчиках с базой данных, чтобы получить местоположение контакта и значение импеданса, поскольку амплитуда отражения напрямую связана с импедансом контакта.

Метод акустического многоточечного тактильного зондирования, основанный на картине дифракции ультразвуковой волны с амплитудными возмущениями [28]. Медная пластина с распространяющимися волнами Лэмба включает в себя множество дискретных точек (x, y) на поверхности. Для одной

локализации индекса заранее заданная акустическая сигнатура, связанная с одной дискретной точкой (x, y) , рассматривается как один шаблон. При контакте с этой пластинкой, обнаруживается сигнал поглощения (или ослабленный сигнал) распространяющейся волны Лэмба и записывается в массив $p_m = (A_{1m}, A_{2m}, \dots, A_{Nm})$, где m – индекс приемника волн Лэмба, A_{im} – амплитуда одного частотного элемента БПФ, N – половина точек сбора данных. Затем локализация включает этап распознавания образов, полученных на этапе калибровки и находящихся в массиве $p_{mref} = (A_{1mref}, A_{2mref}, \dots, A_{Nmref})$ и нахождении ближайшего шаблона к объекту амплитудного вектора. Поиск ближайшего соседства используется с различными определениями расстояния (d_m), такими как Манхэттенское расстояние:

$$d_m(P_m P_{mref}) = \sum_{i=1}^n |A_i - A_{iref}| \quad (3.2)$$

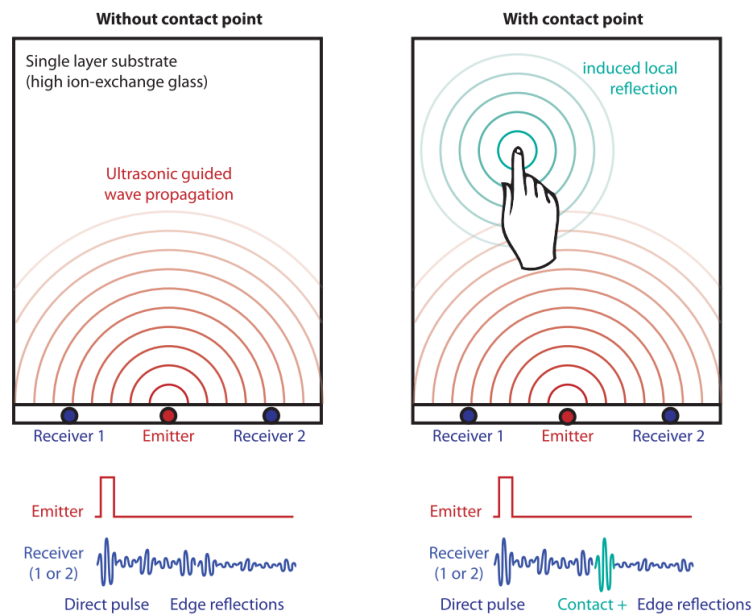


Рисунок 3.2 – Принцип работы вычислительной системы с контактным импедансом

Метод активного акустического зондирования (AAS) для определения места касания на эластичной сенсорной панели [29]. В этом методе касание,

используемое для возбуждения системы AAS в точке (x_0, y_0) , может быть аппроксимировано как нормальная, гармонически управляемая точечная сила F .

Предполагая, что панель имеет прямоугольную форму, решение уравнения движения для тонкой демпфированной изотропной панели, приводимой в движение внешним давлением $P(x, y, t)$, может быть представлено в виде суммы изгибных мод (m, n) в вертикальном и горизонтальном измерениях:

$$\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \nabla^4 u(x, y, t) + \rho h \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial t^2} + b \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} = P(x, y, t), \quad (3.3)$$

где $u(x, y, t)$ – смещение панели по нормали к поверхности в положении (x, y) в момент времени t ; ρ – плотность панели; h – толщина панели; b – коэффициент демпфирования; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга материала; ∇^4 – частная производная по трем координатам. Функция $u(x, y, t)$ раскрывается при помощи следующего выражения:

$$u(x, y, \omega) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} F \frac{4\Phi_{mn}(x_0, y_0)}{\rho h S (\omega_{mn}^2 - \omega^2 + \frac{j\omega_{mn}\omega}{Q_{mn}})} \Phi_{mn}(x, y), \quad (3.4)$$

где $u(x, y, \omega)$ – смещение панели как функция положения и частоты; Φ_{mn} – пространственный отклик (m, n) -й моды; S – площадь поверхности панели; ω_{mn} и Q_{mn} – частота и добротность (m, n) -й моды соответственно.

Наглядное представление AAS показано на рисунке 3.3. Входной сигнал $x(t)$ на рисунке 3.3,а накладывается на панель через динамический возбудитель силы. Сигнал, поступающий на прикрепленный сенсор, $y(t)$, фильтруется в соответствии с передаточной функцией $h_0(t)$ с использованием соответствующих положений возбудителя и датчика. Когда к панели прикладывается постоянная сила, например, стилусом, накладываются дополнительные ограничения наряду с начальными граничными условиями. Добавление этих ограничений изменяет передаточную функцию, как показано на рисунке 3.3,б. То, как изменяется передаточная функция, зависит от места, в котором приложена сила.

Метод распознавание жестов касания на поверхностях с использованием акустических сигналов [42]. В этом методе в качестве передаваемого звукового сигнала используется последовательность Задова-Чу (ZC), модулированная синусоидальным носителем. метод заключается в определении функции автокорреляции между последовательностью Задова-Чу и возникающем при касании сигналом. Она имеет узкую ширину пика в 6 выборок, что позволяет разделить звуковые пути, приходящие с небольшой разницей во времени, путем определения пиков, соответствующих их различным задержкам. Другой особенностью метода является возможность применения схемы интерполяции для уменьшения полосы пропускания до 6 кГц, чтобы ее можно было вписать в узкий «неслышимый» диапазон 17÷23 кГц, предоставляемый обычными динамиками и микрофонами.

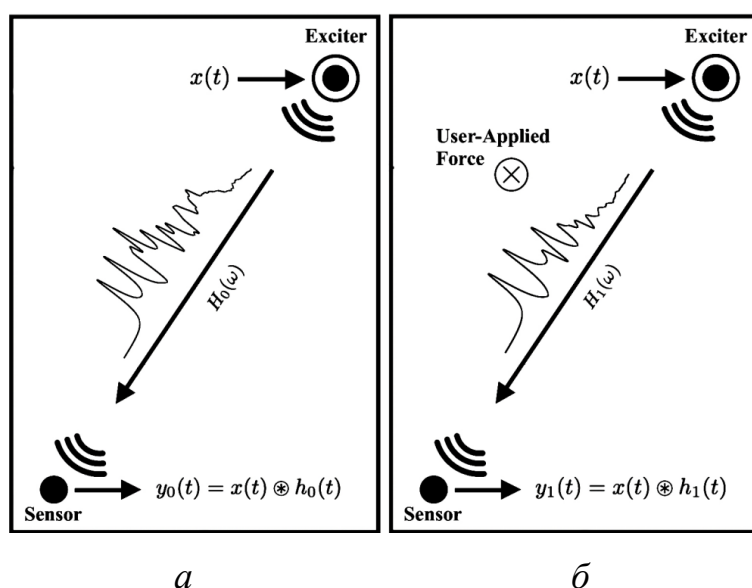


Рисунок 3.3 – Функциональная схема системы AAS: *a* – без приложенной пользователем силы; *б* – с приложенной пользователем силой

Чтобы разделить различные звуковые пути на микрофонах используется кросс-корреляция для оценки импульсной реакции (IR) смешанного звука:

$$\hat{h}_t[n] = \sum_{l=0}^{N_{ZC}-1} ZC_R[t+l] \times ZC_T^*[(l-n) \bmod N_{ZC}], \quad (3.5)$$

где Z_{CR} – сигнал основной полосы частот; Z_{CT} – периодически передаваемый сигнал; N_{ZC} – длина последовательности.

Затем находятся возможные звуковые пути с помощью амплитуды оценки IR. После этого идентифицируется структурный путь, путь прямой видимости (LOS) и путь отражения, с их выравниванием на основе известных положений микрофонов. А в конце применяется алгоритм для расчета фазы и амплитуды каждого звукового пути с высокой частотой дискретизации 48 кГц.

Рассмотренные модели не применимы в разрабатываемой системе по ряду причин: необходимо большее количество оборудования (излучатели, приемники); требуется запись сигнала большей длительности, чем первый экстремум, для частотного анализа; имеет место наложение сигналов; требуется сравнение с записанными ранее шаблонами.

3.2. Разработка аналитической модели определения местоположения точки касания

Координаты неизвестной точки касания (x ; y ; z) можно локализовать по звуку с помощью устройств регистрации звука (микрофонов) как было описано в главе 2.3. В виду того, что координаты микрофонов (x_i ; y_i ; z_i) являются известными значениями можно составить уравнение отрезка по формуле (3.6) в плоскости, по формуле (3.7) в объеме используя две точки координат:

$$S_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2; \quad (3.6)$$

$$S_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2, \quad (3.7)$$

где S – расстояние от точки касания до i -го микрофона. Подставив в (3.7) выражение (2.5) получим следующее равенство:

$$[V(t_i - t_0)]^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2, \quad (3.8)$$

Имея в системе от трех регистрирующих устройств, можно построить систему уравнений в виде:

$$\begin{cases} [V(t_1 - t_0)]^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 \\ [V(t_2 - t_0)]^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 \\ \dots \\ [V(t_i - t_0)]^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 \\ \dots \\ [V(t_n - t_0)]^2 = (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2 \end{cases} \quad (3.9)$$

где n – количество микрофонов. Или другом эквивалентном виде:

$$\begin{cases} V(t_1 - t_0) = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \\ V(t_2 - t_0) = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} \\ \dots \\ V(t_i - t_0) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \\ \dots \\ V(t_n - t_0) = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2} \end{cases} \quad (3.10)$$

Так как позиция z всегда известна для ровной поверхности и равна толщине панели устройства, то неизвестными значениями остаются x , y и t_0 . Для однозначного определения места касания вводится система ограничений (3.11), смысл которой заключается в том, что начальная точка отсчёта координат начинается в точке $x = 0$ и $y = 0$, а время априори не может быть отрицательным:

$$\begin{cases} x \geq 0 \\ y \geq 0, \\ t_0 \geq 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

Ввиду того, что в системе имеется 3 неизвестные: x , y и t_0 , для их нахождения необходимо в системе иметь как минимум 3 уравнения и, как следствие, 3 регистрирующих устройства, как показано на рисунке 3.4. Исходя из минимального количества уравнений в системе, возьмем систему уравнений (3.9)

преобразуем ее следующим образом: раскроем скобки и вычтя 2 уравнение из 1, 3 из 2, 1 из 3 получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 + z_1^2 - z_2^2 - 2xx_1 + 2xx_2 - 2yy_1 + \\ + 2yy_2 - 2zz_1 + 2zz_2 = V^2(t_1^2 - 2t_0t_1 - t_2^2 + 2t_0t_2) \\ x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2 + z_2^2 - z_3^2 - 2xx_2 + 2xx_3 - 2yy_2 + \\ + 2yy_3 - 2zz_2 + 2zz_3 = V^2(t_2^2 - 2t_0t_2 - t_3^2 + 2t_0t_3) \\ x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2 + z_3^2 - z_1^2 - 2xx_3 + 2xx_1 - 2yy_3 + \\ + 2yy_1 - 2zz_3 + 2zz_1 = V^2(t_3^2 - 2t_0t_3 - t_1^2 + 2t_0t_1) \end{cases} \quad (3.12)$$

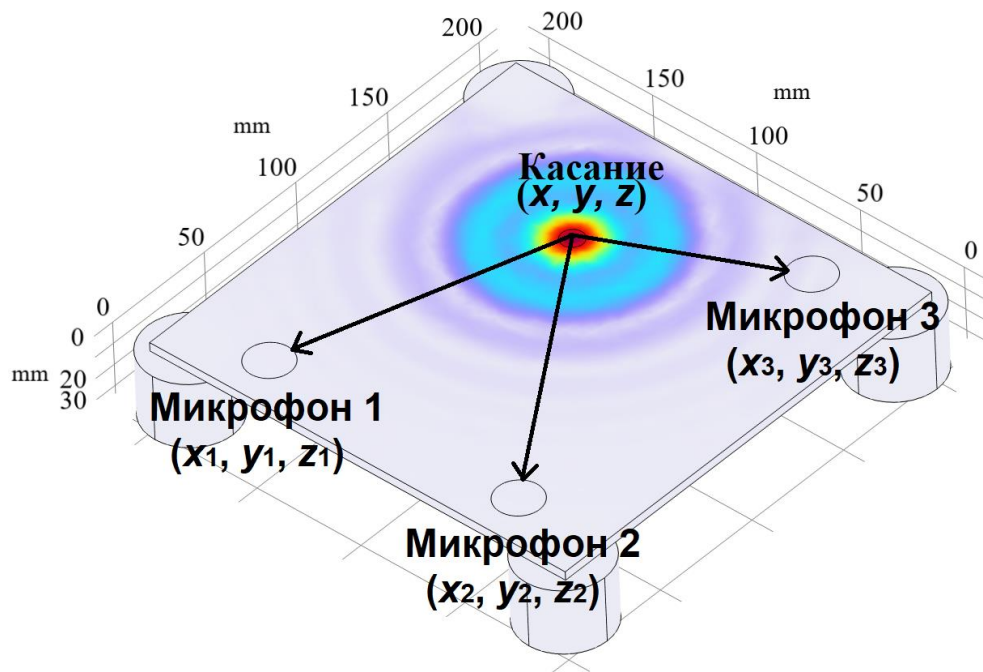


Рисунок 3.4 – Модель, использующая 3 микрофона

Таким образом получилась система линейных уравнений, которую можно исследовать на совместность. Для этого перенесем все неизвестные и их коэффициенты в правую часть, а все известные значения в левую часть, получив следующую систему:

$$\begin{cases} K_{11}x + K_{12}y + K_{13}t_0 = k_1 \\ K_{21}x + K_{22}y + K_{23}t_0 = k_2, \\ K_{31}x + K_{32}y + K_{33}t_0 = k_3 \end{cases} \quad (3.13)$$

где, $K_{11} = 2(x_2 - x_1)$; $K_{12} = 2(y_2 - y_1)$; $K_{13} = 2V^2(t_1 - t_2)$; $k_1 = (x_2^2 - x_1^2) + (y_2^2 - y_1^2) + (z_2^2 - z_1^2) + 2z(z_1 - z_2) + V^2(t_1^2 - t_2^2)$; $K_{21} = 2(x_3 - x_2)$; $K_{22} = 2(y_3 - y_2)$; $K_{23} = 2V^2(t_2 - t_3)$; $k_2 = (x_3^2 - x_2^2) + (y_3^2 - y_2^2) + (z_3^2 - z_2^2) + 2z(z_2 - z_3) + V^2(t_2^2 - t_3^2)$; $K_{31} = 2(x_1 - x_3)$; $K_{32} = 2(y_1 - y_3)$; $K_{33} = 2V^2(t_3 - t_1)$; $k_3 = (x_1^2 - x_3^2) + (y_1^2 - y_3^2) + (z_1^2 - z_3^2) + 2z(z_3 - z_1) + V^2(t_3^2 - t_1^2)$.

Для решения системы уравнений (3.13) нужно определить, является ли она совместной. Для этого воспользуемся теоремой Кронекера-Капелли, найдем ранг расширенной матрицы системы и ранг матрицы системы. Для иллюстрации воспользуемся данными примера параграфа 2.4. Результат расчета приведен в (3.14) и (3.15).

$$\text{rank} \left(\begin{array}{ccc|c} 0,2400 & 0 & 0 & 0,0240 \\ -0,2400 & 0,3200 & -126,9623 & 0,0016 \\ 0 & -0,3200 & 126,9623 & -0,0256 \end{array} \right) = 2 \quad (3.14)$$

$$\text{rank} \left(\begin{array}{ccc} 0,2400 & 0 & 0 \\ -0,2400 & 0,3200 & -126,9623 \\ 0 & -0,3200 & 126,9623 \end{array} \right) = 2 \quad (3.15)$$

Ранг расширенной матрицы системы равен рангу матрицы системы, но меньше числа неизвестных. Из этого следует, что система имеет бесконечно много решений [95, 96]. Добавление еще одного уравнения в эту систему приводит к тому, что ранг расширенной матрицы не равен рангу основной матрицы, а, следовательно, решения она не имеет.

3.3. Разработка численной модели определения местоположения точки касания

Как было сказано ранее, система уравнений не имеет аналитического решения, однако ее решение можно получить, используя численные методы. Для этого выразим правую часть уравнения (3.9) другим эквивалентным способом. Имея момент времени регистрации звуковой волны микрофоном, можно получить

разницу Δt между временем регистрации 1 (ближайшим к месту касания) устройством и остальными:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0; \Delta t_i = t_i - t_1, \quad (3.16)$$

где $i = 2, 3$. Неизвестным является только момент времени касания t_0 , остальные — определяются микроконтроллером.

Опишем путь S от точки касания до ближайшего регистрирующего устройства (используем обозначение без индекса, так как эта величина неизвестна, и ее нужно определить):

$$S = V\Delta t_1. \quad (3.17)$$

Определим, какое расстояние S_i прошла звуковая волна с момента регистрации 1-м устройством до момента регистрации другими устройствами:

$$S_i = V\Delta t_i, \quad (3.18)$$

где $i \in [2; A]$. Таким образом, новое представление системы уравнений (3.9), использующей 3 микрофона будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} (S)^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 \\ (S + S_2)^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2, \\ (S + S_3)^2 = (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 \end{cases} \quad (3.19)$$

где неизвестными являются S , x и y . Наглядное представление системы уравнений (3.19) показано на рисунке 3.5.

Применим модифицированный метод Ньютона для нахождения трех неизвестных системы уравнений (3.19). Для этого выразим каждое уравнение через функцию F_i :

$$\begin{cases} F_1 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 - (S)^2 \\ F_2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 - (S + S_2)^2 \\ F_3 = (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 - (S + S_3)^2 \end{cases} \quad (3.20)$$

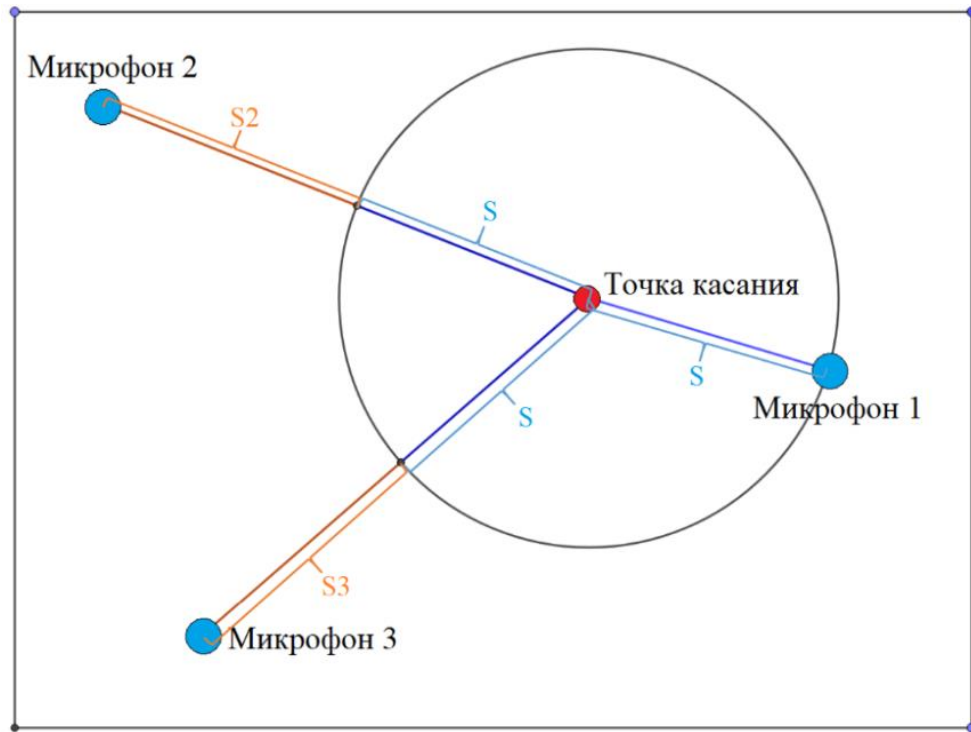


Рисунок 3.5 – Графическое представление системы уравнений (3.19)

Для получения значений каждой из функций F_i необходимо задать начальное приближение каждой неизвестной переменной S , x и y , например:

$$\begin{cases} x_{\text{нп}} = \frac{W}{2} \\ y_{\text{нп}} = \frac{L}{2}, D = \sqrt{H^2 + W^2 + L^2}, \\ S_{\text{нп}} = \frac{D}{2} \end{cases} \quad (3.21)$$

где D – пространственная диагональ, H – высота, W – ширина; L – длина сенсорной панели. Теперь с помощью полученных начальных приближений можно найти значения как самих функций F_i , так и их частных производных, с помощью которых можно построить матрицу Якоби и найти ее определитель $\det J$:

$$\det J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} & \frac{\partial F_1}{\partial S} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} & \frac{\partial F_2}{\partial S} \\ \frac{\partial F_3}{\partial x} & \frac{\partial F_3}{\partial y} & \frac{\partial F_3}{\partial S} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Затем, с помощью полученных значений F_i и $\det J$ можно найти корректирующее значение начального приближения неизвестных ΔS , Δx и Δy :

$$\Delta x = \frac{\begin{bmatrix} F_1 & \frac{\partial F_1}{\partial y} & \frac{\partial F_1}{\partial S} \\ F_2 & \frac{\partial F_2}{\partial y} & \frac{\partial F_2}{\partial S} \\ F_3 & \frac{\partial F_3}{\partial y} & \frac{\partial F_3}{\partial S} \end{bmatrix}}{\nabla J}, \Delta y = \frac{\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & F_1 & \frac{\partial F_1}{\partial S} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x} & F_2 & \frac{\partial F_2}{\partial S} \\ \frac{\partial F_3}{\partial x} & F_3 & \frac{\partial F_3}{\partial S} \end{bmatrix}}{\nabla J}, \Delta S = \frac{\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} & F_1 \\ \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} & F_2 \\ \frac{\partial F_3}{\partial x} & \frac{\partial F_3}{\partial y} & F_3 \end{bmatrix}}{\nabla J} \quad (3.23)$$

Поле выполнения всех расчетов полученные значения сравниваются с системой ограничений:

$$\begin{cases} |\Delta x| \leq \varepsilon \\ |\Delta y| \leq \varepsilon \\ |\Delta S| \leq \varepsilon \\ x \geq 0 \\ y \geq 0 \\ S \geq 0 \end{cases}, \quad (3.24)$$

где ε – допустимое отклонение между расчетами итераций. В случае несоответствия Δx , x , Δy , y , ΔS или S хотя бы одному из условий полученное корректирующее значение вычитается из начального приближения, и процедура повторяется снова. Добавление четвертого уравнения для решения этой системы приводит к тому, что размерность матрицы Якоби становится 4×3 . Для нахождения определителя такой матрицы необходимо отбросить одну строку. Это приводит к

тому, что требуется найти определители для четырех матриц Якоби со следующими комбинациями уравнений для микрофонов (M): {M1, M2, M3}; {M1, M2, M4}; {M1, M3, M4}; {M2, M3, M4}. Вычисление всех комбинаций увеличит время расчета в 4 раза.

3.4. Разработка программных моделей локализации точки касания

Программная модель предложенной численной модели написана на языке СИ для последующего внедрения в микроконтроллер. Программа работает по алгоритму, изображенному на рисунке 3.6.

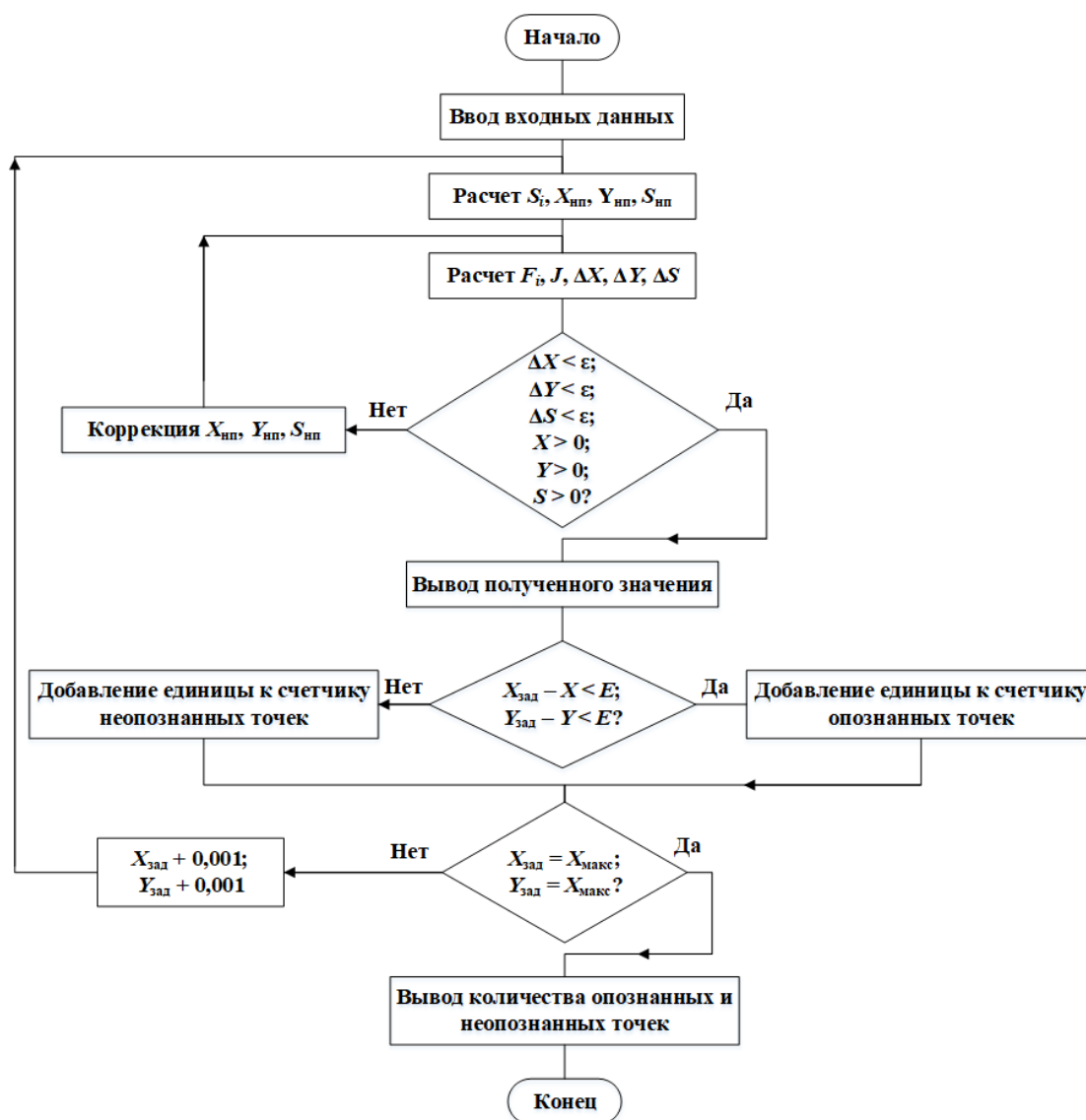


Рисунок 3.6. Алгоритм работы программы

Задаваемые начальные параметры устройства для работы вычислительной системы следующие: высота сенсорной панели $L = 0,14$ м, ширина $W = 0,1$ м, высота $H = 0.004$ м, скорость распространения звуковой волны в алюминии $V = 6360$ м/с, погрешность E (разница между координатами рассчитанной точкой касания и заданной) должна быть не более 10^{-4} м, допустимое отклонение между расчетами итераций $\varepsilon = 10^{-6}$ м.

Для оценки адекватности предлагаемой модели с учетом заданных параметров было выбрано несколько возможных размещений микрофонов, показанных в таблице 3.1. Выбор размещений основывается на том, чтобы оценить ее работу при равномерном и не равномерном распределении микрофонов под поверхностью основы устройства.

Таблица 3.1 – Размещение микрофонов

№	Микрофон	х, м	у, м	z, м	№	Микрофон	х, м	у, м	z, м
1	M1	-0,01	-0,01	0,004	7	M1	-0,01	-0,01	0,004
	M2	-0,01	0	0,004		M2	0,05	0,07	0,004
	M3	-0,01	0,01	0,004		M3	0,11	0,15	0,004
2	M1	0,025	0,04	0,004	8	M1	0,025	0,035	0,004
	M2	0,025	0,05	0,004		M2	0,05	0,07	0,004
	M3	0,025	0,06	0,004		M3	0,075	0,105	0,004
3	M1	0,05	0,06	0,004	9	M1	0,04	0,06	0,004
	M2	0,05	0,07	0,004		M2	0,05	0,07	0,004
	M3	0,05	0,08	0,004		M3	0,06	0,08	0,004
4	M1	-0,01	-0,01	0,004	10	M1	-0,01	-0,01	0,004
	M2	-0,01	0,15	0,004		M2	0,05	0,15	0,004
	M3	0,11	-0,01	0,004		M3	0,11	-0,01	0,004
5	M1	0,025	0,035	0,004	11	M1	0,025	0,035	0,004
	M2	0,025	0,105	0,004		M2	0,05	0,105	0,004
	M3	0,075	0,035	0,004		M3	0,075	0,035	0,004
6	M1	0,04	0,06	0,004	12	M1	0,04	0,06	0,004
	M2	0,04	0,08	0,004		M2	0,05	0,08	0,004
	M3	0,06	0,06	0,004		M3	0,06	0,06	0,004

Для каждого размещения для начала оценено наилучшее начальное приближение (НП), которое показано на рисунке 3.7 и в приложении В. Оценка R

(количество локализованных точек в %) проводилась путем расчета точек касания по всей поверхности экрана с шагом ее изменения по оси x и $y = 0,001$ м, всего точек 14241 штук.

Задача – определить НП и N для $R \rightarrow 100\%$. Исходя из полученных результатов, наилучшим размещением микрофонов является размещение за границей (неактивной части) экрана в виде полосы микрофонов в одном углу, прямоугольного треугольника с микрофонами в трех углах и равнобедренного треугольника с микрофонами в двух углах и одним по центру, а именно размещения: 1, 4 и 10. Именно такие размещения показали 100% результат локализации места с разными начальными приближениями в то время как остальные не могли достигнуть 100% отметки с каким-либо НП. Для всех трех размещений есть одно объединяющее начальное приближение, которое рассчитывается по формуле (3.21).

Построим зависимость точности локализации R от НП при заданных размещениях:

$$R = f(\text{НП}) \mid N = \text{const} \quad (3.25)$$

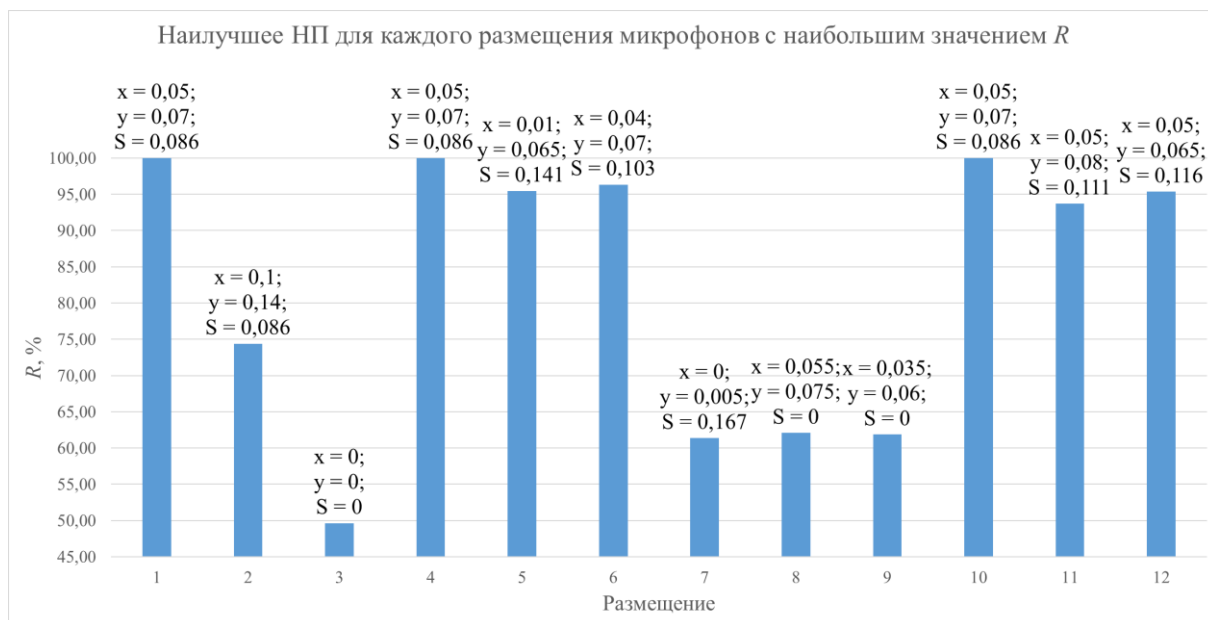


Рисунок 3.7 – Наилучшее НП с наибольшим R для каждого размещения микрофонов

Теперь, зная наилучшие размещения микрофонов и их начальные приближения, необходимо решить следующую задачу – определить ε и E для $R \rightarrow 100\%$. В качестве анализа было использовано отклонение между итерациями от 0,000001 м до 1 м с разницей между соседними значениями в 10 раз, а разница между рассчитанным и заданным от 0,000001 м до 0,001 м с разницей между соседними значениями в 10 раз. Результаты можно увидеть на рисунке 3.8.

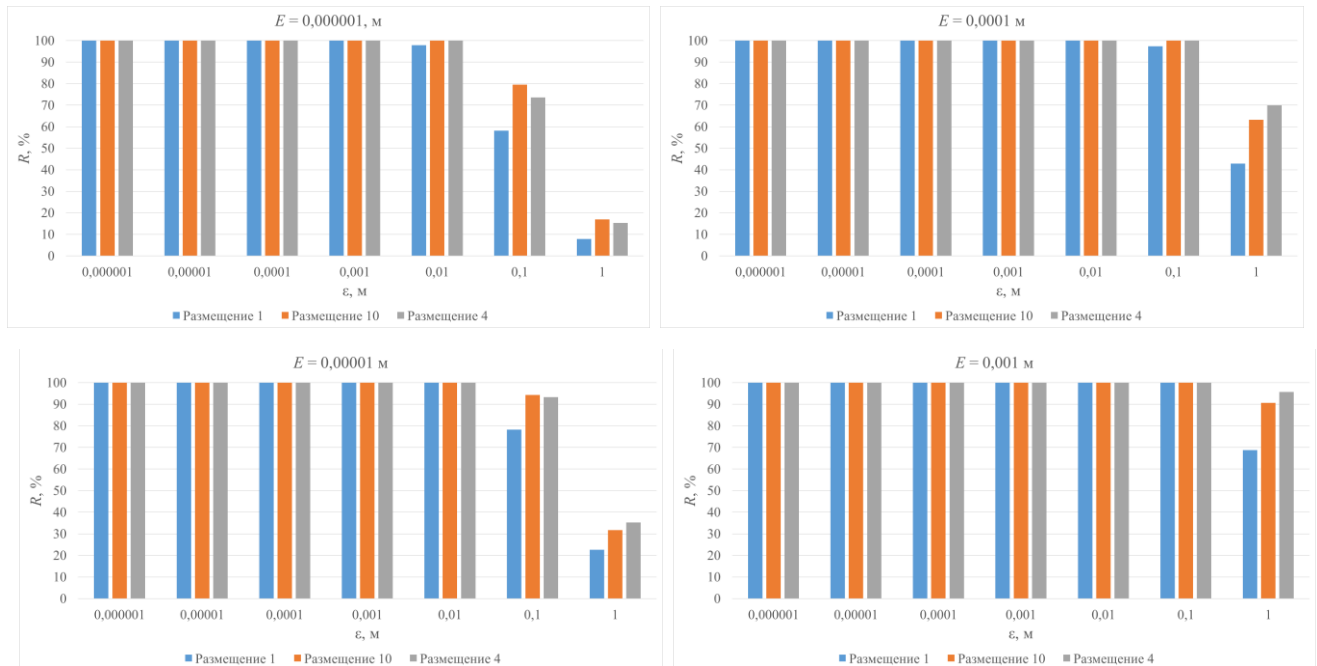


Рисунок 3.8 – Точность локализации R (в %) в зависимости от значения отклика между итерациями ε при заданных номере размещения микрофонов N и значениях погрешности принятия решения E

Построим зависимость точности локализации R от значения отклика между итерациями ε при заданных номере размещения микрофонов N и значениях погрешности между ожидаемым и вычисленным значением E :

$$R = f(\varepsilon) \mid N = const, E = const \quad (3.26)$$

В результате получилось, что размещение 1 более подвержено изменению ε , чем размещения 4 и 10. При E :

- 0,000001 м, наименьшее ε при размещении 1 = 0,001 м, а при 4 и 10 = 0,01 м;
- 0,00001 м, наименьшее ε при размещении 1, 4 и 10 = 0,01 м;
- 0,0001 м, наименьшим ε при размещении 1 = 0,01 м, а при 4 и 10 = 0,1 м;
- 0,001 м, наименьшим ε при размещении 1, 4 и 10 = 0,1 м.

Теперь, используя полученные значения ε и E и с их помощью настроив программную модель, можно решить следующую задачу – определить E и ε для $Q \rightarrow 1$, где Q – количество итераций, затрачиваемых на расчёт каждой точки касания. Полученные результаты показаны на рисунке 3.9 и приложении Г.

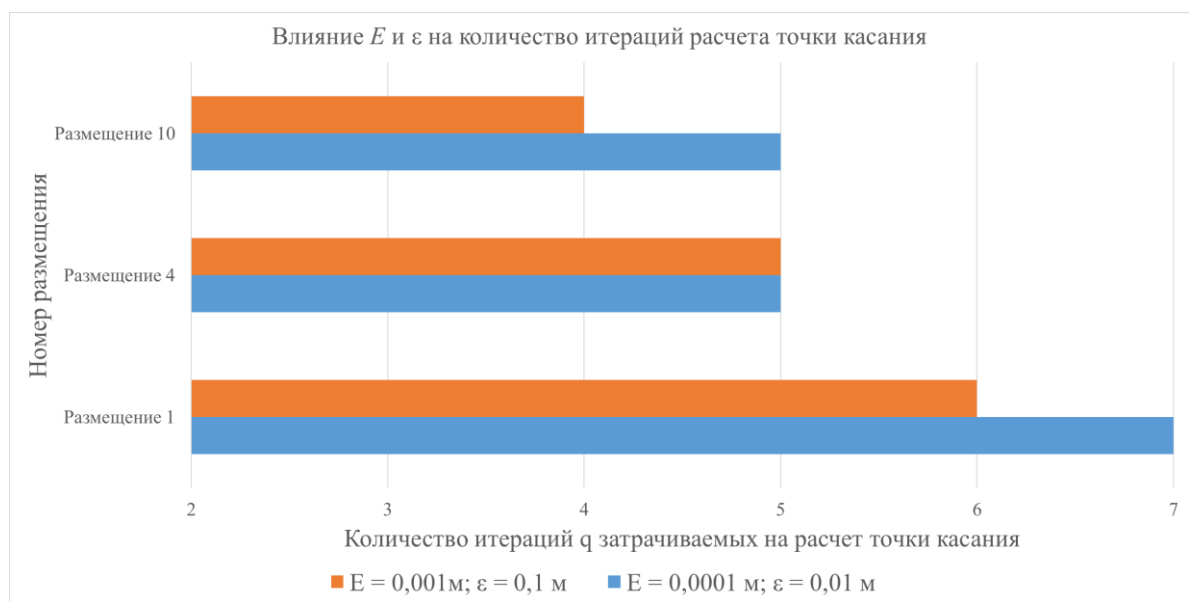


Рисунок 3.9 – Зависимость количество итераций, затрачиваемых на расчет точки касания

Исходя из полученных результатов можно выявить, что с понижением допустимого ε и E , снижается количество итераций, требуемых на расчет точки касания, при этом точность локализации не меняется. Также можно отметить, что размещение 10 проявило себя лучше и затратило от 2 до 4 итераций на расчет точки касания в то время как позиции 1 и 4 затратили от 2 до 6 и 2 до 5 итераций соответственно. Из вышеперечисленного можно построить следующую зависимость:

$$Q = f(E, \varepsilon) \mid N = \text{const} \quad (3.27)$$

Задача – определить W и H для $R \rightarrow 100\%$. На основании полученных результатов будем использовать размещение 1, 4 и 10 с $E = 0,001$, м, $\varepsilon = 0,1$, м и $E = 0,0001$ м, $\varepsilon = 0,01$ м. Начальные габариты будут следующие: ширина $w = 0,1$ м, высота $l = 0,1$ м, шаг изменения габаритов $0,001$ м пока не достигнет размеров $w = 0,5$ м и $l = 0,5$ м. Результаты можно увидеть на рисунке 3.10 и приложении Д.

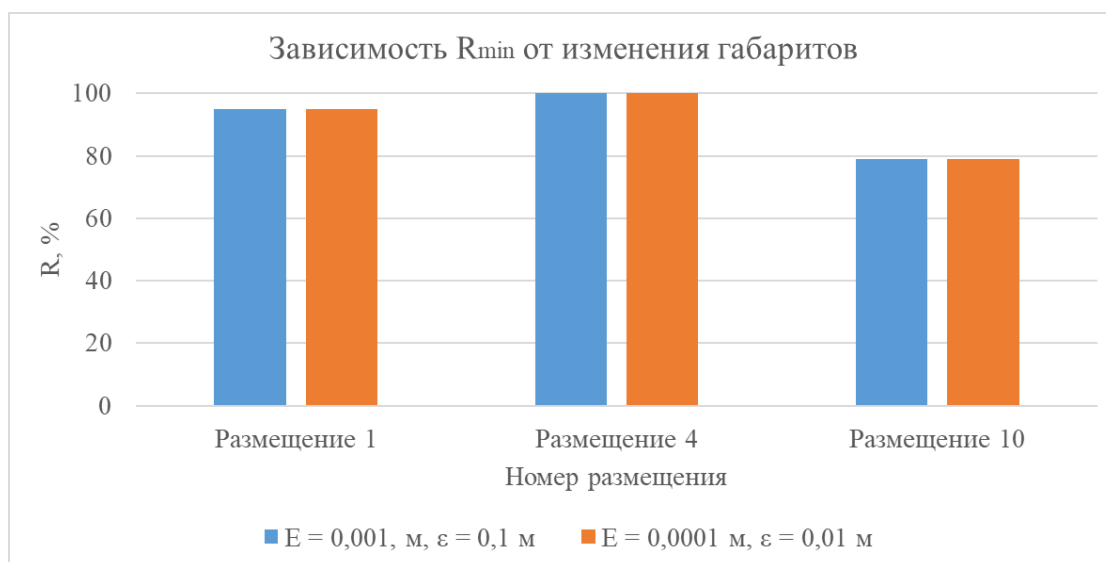


Рисунок 3.10 – Влияние изменения габаритов $W \times H$ на R_{min}

Исходя из полученных результатов можно сказать, что рассматриваемые размещения ведут себя по-разному. При размещении 1 точность локализации начинает ухудшаться (относительной 100 %) при размерах, меньших $W = 0,23$ м и $L = 0,5$ м, и достигает $R_{min} = 95,10$ % при размерах $W = 0,1$ м и $L = 0,5$ м. Размещение 4 дало 100% локализацию мест касания при любых габаритах. При размещении 10 точность локализации начинает ухудшаться (относительной 100 %) при размерах, больших $W = 0,18$ м и $L = 0,1$ м, и достигает $R_{min} = 78,89$ % при размерах $W = 0,5$ м и $L = 0,1$ м. Из этого можно построить следующую зависимость:

$$R = f(W, L) \mid N = const, E = const, \varepsilon = const \quad (3.28)$$

Таким образом на точность локализации и вычислительную сложность предложенной модели влияют такие параметры как: расположение микрофонов,

габариты сенсорной панели, разница между расчетами итераций и требуемого отклонения от заданной точки касания. Однако исходя из исходных данных для ее применения можно настроить модель на 100% локализацию места касания.

3.5. Экспериментальное исследование разработанных моделей локализации точки касания

Проанализируем работу предложенной численной модели со всеми имеющимися данными, влияющими на ее работоспособность, по сравнению с другими способами решения систем нелинейных алгебраических уравнений (СНЛАУ). Для сравнения будем использовать метод простых итераций и метод Зейделя, а исследуемая система уравнений будет в виде (3.20).

В качестве исходных данных будем использовать следующие начальные параметры устройства для сравнения работы вычислительного аппарата системы: длина сенсорной панели $L = 0,14$ м, ширина $W = 0,1$ м, высота $H = 0.004$ м, скорость распространения звуковой волны в алюминии $V = 6360$ м/с, размещения микрофонов – 1, 4 и 10, разница между рассчитанной точкой касания и заданной E должна быть не более 0,001 м, допустимое отклонение между расчетами итераций $\varepsilon = 0,1$. Используемые начальные приближения показаны в таблице 3.2. Полученные результаты можно увидеть на рисунке 3.11.

Использование других подходов для локализации точки касания демонстрирует значительно худшие результаты по сравнению с предлагаемым способом. В связи с этим предлагается применить встроенные численные методы в программной среде SciLab 2023.1.0.

Предлагаемое программное обеспечение позволяет использовать нелинейный системный решатель (функция `fsolve`), который решает задачу, заданную как: $F(x) = 0$ для x , где $F(x)$ является функцией, которая возвращает векторное значение. В этом методе находится ноль системы n нелинейных функций от n переменных с помощью модификации гибридного метода Пауэлла, в который входит Якобиан [97, 98]. В качестве системы уравнений для функции `fsolve` будем

использовать систему уравнений (3.20). Исходные параметры для решения системы остаются прежними. Результаты можно увидеть на рисунке 3.12.

Таблица 3.2 – Начальные приближения и их обозначения для оценки численных методов.

НП1	$x = W/2, y = L/2, S = D/2$	НП5	$x = 0, y = 0, S = D/2$
НП2	$x = W, y = L, S = D$	НП6	$x = W/2, y = L/2, S = 0$
НП3	$x = W/2, y = L/2, S = D$	НП7	$x = 0, y = 0, S = 0$
НП4	$x = W, y = L, S = D/2$		

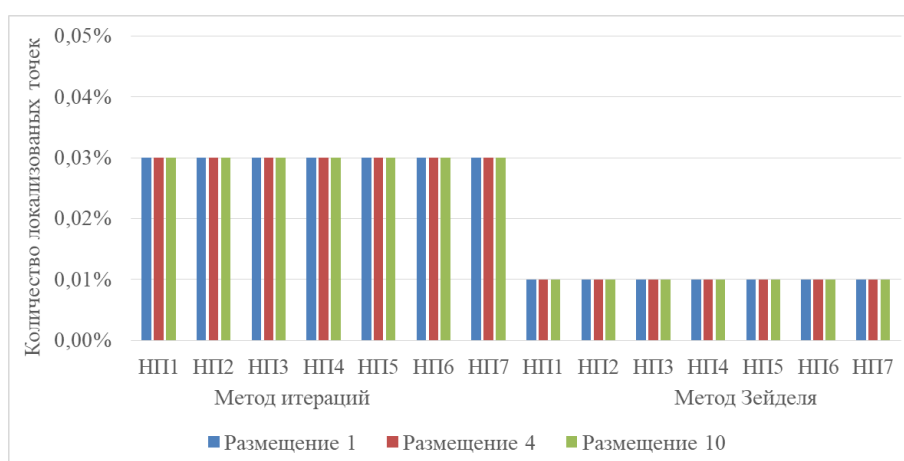


Рисунок 3.11 – Результаты локализации с использованием метода итераций и метода Зейделя

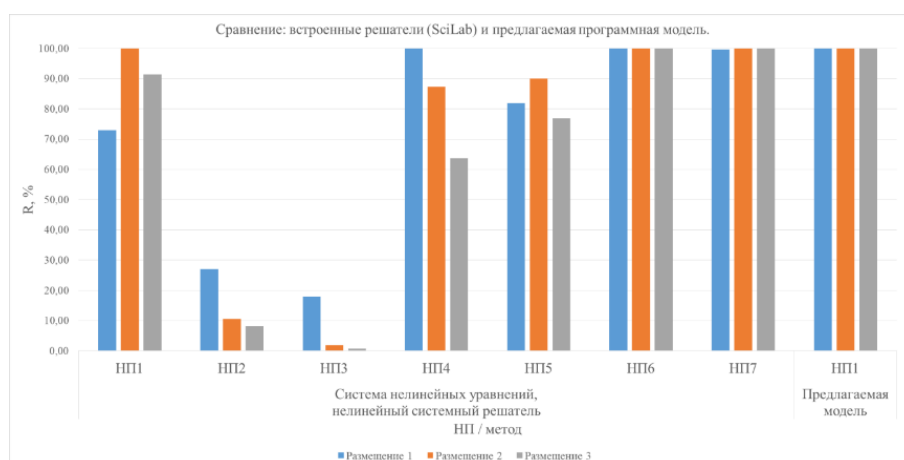


Рисунок 3.12 – Сравнение решения системы уравнений функцией fsolve с предлагаемой моделью

Нелинейный системный решатель, встроенный в Scilab и использующий метод Ньютона, с НП 6 и 7 показал лучшие результаты. Разработанная численная модель показала высокую точность локализации и позволила выбрать лучшие конфигурации расположения регистрирующих устройств. Она может быть применена для реализации во встроенном программном обеспечении микроконтроллера создаваемой вычислительной системы.

3.6. Выводы по главе

В данной главе были рассмотрены разные математические модели локализации источника звука вычислительными системами в акустических сенсорных экранах. Однако существующие методы обладают либо высокой вычислительной сложностью, либо высокой погрешностью локализации, либо предназначены для работы с крупногабаритными экранами.

В связи с этим была разработана математическая модель для локализации источника звука вычислительной системой и доказано отсутствие аналитического решения, поскольку построенная система уравнений является несовместной. Выбран способ решения численным методом, имеющим лучшие показатели точности и эффективности практической реализации в заданном аппаратурно-программном базисе. Решение разработанной модели выбранным численным методом позволяет локализовать место касания с минимальными затратами вычислительных ресурсов. Проведены исследования зависимости точности локализации от мест размещения регистрирующих устройств и начального приближения численной модели. Наилучшими расположениями являются размещения микрофонов в виде линии в углу, прямоугольного или равнобедренного треугольника. По результатам выполненного программного моделирования наилучшим заданием начального приближения является приближение по центру. В этом случае точность локализации 100%. По результатам моделирования выяснено, что габариты экрана не оказало влияние на

точность локализации только при размещении регистрирующих устройств в виде прямоугольного треугольника.

Предложенная численная модель сравнивалась с другими математическими моделями (метод простых итераций и метод Зейделя), а также с встроенными численными алгоритмами программного обеспечения SciLab 2023.1.0. Результаты сравнения показали превосходство в точности и быстродействии предлагаемой модели над другими методами решения СНЛАУ.

4. Создание метода разработки вычислительной системы сенсорного устройства ввода информации на основе акустических измерительных преобразователей

4.1. Обзор и анализ методов разработки вычислительных систем акустических сенсорных устройств

Вопросами методов разработки вычислительных систем в акустических устройствах ввода информации посвящены работы российских и зарубежных ученых [22, 30-34]. В частности, часто применяемые методы рассмотрены в следующих работах.

В работе [44] представлен метод пассивной гигантской сенсорной экранной панели (GTP). Заложенный метод ее функционирования основывается на TDOA, устройство локализует низкоэнергетические воздействия около 1 мДж, создаваемые постукиваниями ногтями. Это позволяет спроектировать устройство ввода информации с максимальным размером 10 м².

Первым шагом в создании такого устройства и его вычислительной системы является выбор расположения четырех регистрирующих устройств, в частности описываются два варианта размещения – в виде ромба и прямоугольника. Затем рассчитываются скорости распространения колебаний в материале. По полученным значениям проводится калибровка датчиков в части их чувствительности для любых габаритов и обеспечения наилучшего соотношения сигнал/шум. Затем разрабатывается предварительный усилитель и фильтр нижних частот, подбирается АЦП и контроллер. Выходным результатом такого метода получается вычислительная система, показанная на рисунке 4.1.

Предложенный метод является достаточно наполненным в части разработки вычислительной системы акустического сенсорного устройства. Однако, предложенный метод является узконаправленным в виду отсутствия вариативности в выборе компонент или, например, расположения регистрирующих устройств.

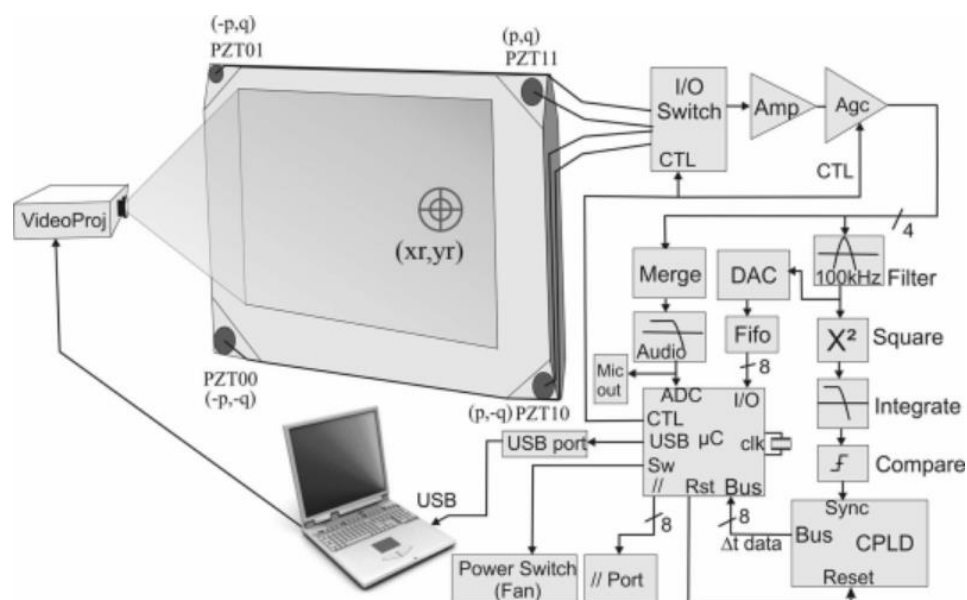


Рисунок 4.1 – Общий вид вычислительной системы для GTP

Метод представленный в [45] нацелен на реализацию вычислительной системы, которая может использовать любое устройство регистрации колебаний, вызванных касанием. Такой подход позволяет реализовать масштабируемые, удобные, отзывчивые и портативные вычислительные системы. Для её реализации предложены четыре ключевых шага разработки:

- определение времени прибытия колебаний от места касания до регистрирующих устройств;
- выбор активной области сенсорного устройства (рисунок 4.2,а);
- калибровка вычислений с помощью определенных точек касания (рисунок 4.2,б);
- оценка положения касания, определяющая правильность выполнения предыдущих шагов.

В работе [46] предлагается разработка вычислительной системы, ориентированной на распознавание зарегистрированных колебаний путем сопоставления шаблонов. Создание такой системы разделено на несколько шагов. Для начала подбирается коэффициент взаимной корреляции для того, чтобы сделать систему менее восприимчивой к ложным срабатываниям. Затем выбирается количество регистрирующих устройств и их тип, например,

пьезоэлектрические мембраны, электретные микрофоны и акселерометры с учетом того, что чем их больше, тем точнее будет результат. После разрабатывается пост-фильтр, в частности, авторы предлагают применить фильтр Чебышева с частотой среза 4 - 8 кГц. В конце подбирается обрабатывающее устройство, в которое будет заложен алгоритм вычисления места касания. Когда система будет в сборе ее функционирование делится на 2 этапа – обучение и распознавание. На первом этапе вносятся шаблоны сигналов, полученные в заведомо известных точках касания. На втором этапе, используя полученные шаблоны, происходит их сопоставление при касании в неизвестной точке.

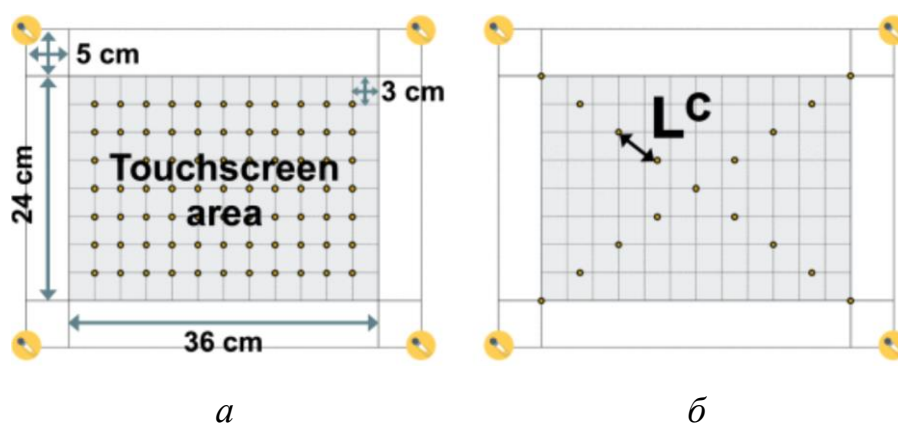


Рисунок 4.2 – Проектирование устройства для настройки вычислительной системы: *а* – настройка рабочих областей; *б* – калибровка вычислительной системы в определенных точках панели

Метод позволяет сделать устройство ввода практически из любого материала. Однако для функционирования в низкопроизводительном базисе такую вычислительную систему сложно реализовать в виду хранения большого количества шаблонов для сопоставления. В свою очередь уменьшение количества шаблонов приводит к понижению точности локализации

На основании вышеизложенного, при создании вычислительных систем акустических сенсорных устройств ввода информации необходимо учитывать следующие параметры: высокая точность локализации места касания и помехоустойчивость; невысокую вычислительную сложность; иметь возможность

реализации любых габаритов; реализация в базисах разной производительности; доступность для отечественного производства. В связи с этим предлагается метод разработки таких вычислительных систем, основанный на предложенном в диссертационной работе способе локализации места касания и математической модели определения местоположения точки касания.

4.2. Назначение и описание основных этапов предложенного метода

Этапы метода состоят из двух основных процедур – анализа и синтеза, которые тесно взаимосвязаны друг с другом. Анализ подразумевает обзор исходных данных и требований, расчеты, моделирование и т.д. Синтез содержит элементы проектирования, конструирования, сборки, тестирования и т.п. При необходимости, на каждом этапе может быть выполнен возврат на любой из предыдущих этапов [99].

Этап 1: анализ исходных данных и требований. Для начала необходимо ввести исходные данные – условия, в которых будет эксплуатироваться система устройства (помещение, открытый воздух, море, пустыня и т.д.), допустимый размер устройства, который зависит от его места использования, и необходимую скорость работы.

Этап 2: подбор материала и определение конструктивных особенностей. На основе анализа исходных данных выбираются подходящие материалы для основы сенсорного экрана, используемого в устройстве, и рассчитываются скорости звука в них.

Этап 3: моделирование устройства и применяемой вычислительной системы, определение их параметров. На этом этапе сначала проводится моделирование воздействий окружающей среды на выбранные материалы поверхности. Затем анализируются возможные места размещения регистрирующих звуковую волну устройств под поверхностью экрана и кнопок на поверхности. Далее проводится моделирование сигналов, поступающих по координатам, где будут располагаться регистрирующие устройства. После этого определяется необходимость усиления

или фильтрации сигналов. В конце вносятся правки в коррекцию приближенного решения численной модели в соответствии с изначально заданной допустимой погрешностью определения точки касания.

Этап 4: проектирование вычислительной системы. На основании ранее полученных расчетов и данных на этом этапе необходимо выбрать критерии для АЦП, микроконтроллера, который будет выполнять расчёты, фильтров, усилителей и т. п. Помимо этого, разрабатывается программное и техническое обеспечение для контроллера, основанное на предлагаемых моделях и способе.

Этап 5: создание опытного образца. На этом этапе подбираются компоненты для вычислительной системы и устройства. В случае отсутствия того или иного компонента или его наличия с другими характеристиками необходимо вернуться к этапу, который повлиял на выбор этого элемента, и при необходимости внести коррективы. Помимо этого, разрабатывается программное обеспечение для контроллера, основанное на предлагаемых моделях и способе.

Этап 6: испытание вычислительной системы на опытном образце. Когда все компоненты системы будут приобретены, а сборка завершена, необходимо провести испытания в соответствии с теми параметрами, которые были заданы изначально и использованы при моделировании. В случае получения отрицательных результатов при испытаниях необходимо установить их причины, а также определить компоненты, повлиявшие на это. Затем следует вернуться к этапу анализа, на котором был выбран повлиявший компонент, и провести коррекцию в соответствии с имеющимися возможностями.

4.3. Структура и состав аналитических этапов метода

Аналитическими этапами предлагаемого метода можно назвать этапы 1 – 3. В этих этапах выполняются расчеты, моделирование и подбор параметров компонент как самой вычислительной системы, так и устройства, в котором она функционирует.

Для углубленного понимания каждого этапа используем следующий пример для проектирования вычислительной системы.

Дано: разработать систему устройства ввода информации, которое выполняет функцию пульта оператора крановщика.

Назначение: на пульте оператора должны быть 4 кнопки: «Вниз», «Вверх», «Вправо» и «Влево», по нажатию которых будет происходить соответствующее действие машины.

Требования: допустимый размер варьируется в диапазоне от 20x10x5 см до 30x20x10 см. Время реагирования после касания не должно превышать 1 мс, а допустимая погрешность локализации места касания – не более ± 1 мм. Функционирование устройства выполняется внутри кабины крана.

Этап 1. Этот этап начинается с анализа условий эксплуатации так как их влияние оказывает наибольшую роль на работоспособность как вычислительной системы, так и самого устройства. К условиям эксплуатации относятся, согласно [100], температура, влажность воздуха, давление воздуха или газа (высота над уровнем моря), солнечное излучение, дождь, ветер, пыль (в том числе снежная), смены температур, соляной туман, иней, гидростатическое давление воды, действие плесневых грибов, содержание в воздухе коррозионно-активных агентов.

Исходя из описанных условий в рассмотренном выше примере, можно получить следующую информацию: устройство будет использоваться внутри кабины крана, которая, согласно [101], должна быть оборудована устройствами (вентиляторами, отоплением, кондиционерами и др.), обеспечивающими на постоянных рабочих местах оптимальные температуру, относительную влажность и скорость движения воздуха, а также содержание в воздухе пыли в пределах «Санитарных норм проектирования промышленных предприятий». Из этого следует что, к выбору компонентов для вычислительной системы и устройства нет жестких требований, поэтому можно использовать любой материал, проводящий звук.

Далее анализируются допустимые габариты устройства. Выбор размеров устройства основывается на том в каком месте оно будет использоваться. Их выбор

влияет на то, какое количество пространства внутри будет выделено для размещения системы и дополнительной периферии в виде усилителей или фильтров, а также на размеры кнопок и вариации размещений регистрирующих устройств. Как было описано в главе 3, габариты при определенных размещениях регистрирующих устройств, могут оказывать отрицательное влияние на качество локализации.

Исходя из требований приведенного примера габариты уже предоставлены и могут свободно варьироваться в заданных пределах.

Завершающим шагом первого этапа является анализ скорости работы и точности. Скорость работы вычислительной системы представляет из себя скорость отклика – время, необходимое для того, чтобы вычислительная система устройства произвела ответ на действие пользователя и произошло появление соответствующего результата на экране или в управляющей системе. Например, в производственной среде скорость отклика критически важна, так как задержки могут привести к: увеличению времени обработки задач, ошибкам в производственном процессе, потере эффективности, и увеличению затрат. Основными факторами, влияющими на скорость отклика, являются: интерфейс подключения (USB, RS-232, RS-485 и т.д.), обработка данных, загруженность системы и аппаратные ограничения.

Помимо перечисленных факторов на скорость работы вычислительной системы влияет чувствительность. Чувствительность в сенсорных устройствах ввода информации – это способность экрана реагировать на даже самые легкие прикосновения или движения. А она, в свою очередь, зависит от регистрирующих звуковую волну устройств, фильтрации и стабилизации, выбранного материала и габаритов сенсорного экрана. На рисунке 4.3 показаны зарегистрированные сигналы серии трех касаний в трех разных точках экрана снятые с одного регистрирующего устройства, расположенного по координатам (0,11; -0,01; 0,004). С каждым касанием прикладываемая сила увеличивалась, и, как видно из рисунка 4.3,б, первое касание почти слилось с нулевым сигналом, в связи с этим его локализация невозможна, однако если применить регистрирующее устройство с

большей чувствительностью и отфильтровать низкочастотную составляющую, то по получившемуся сигналу, показанному на рисунке 4.3,з, уже можно локализовать место касания.

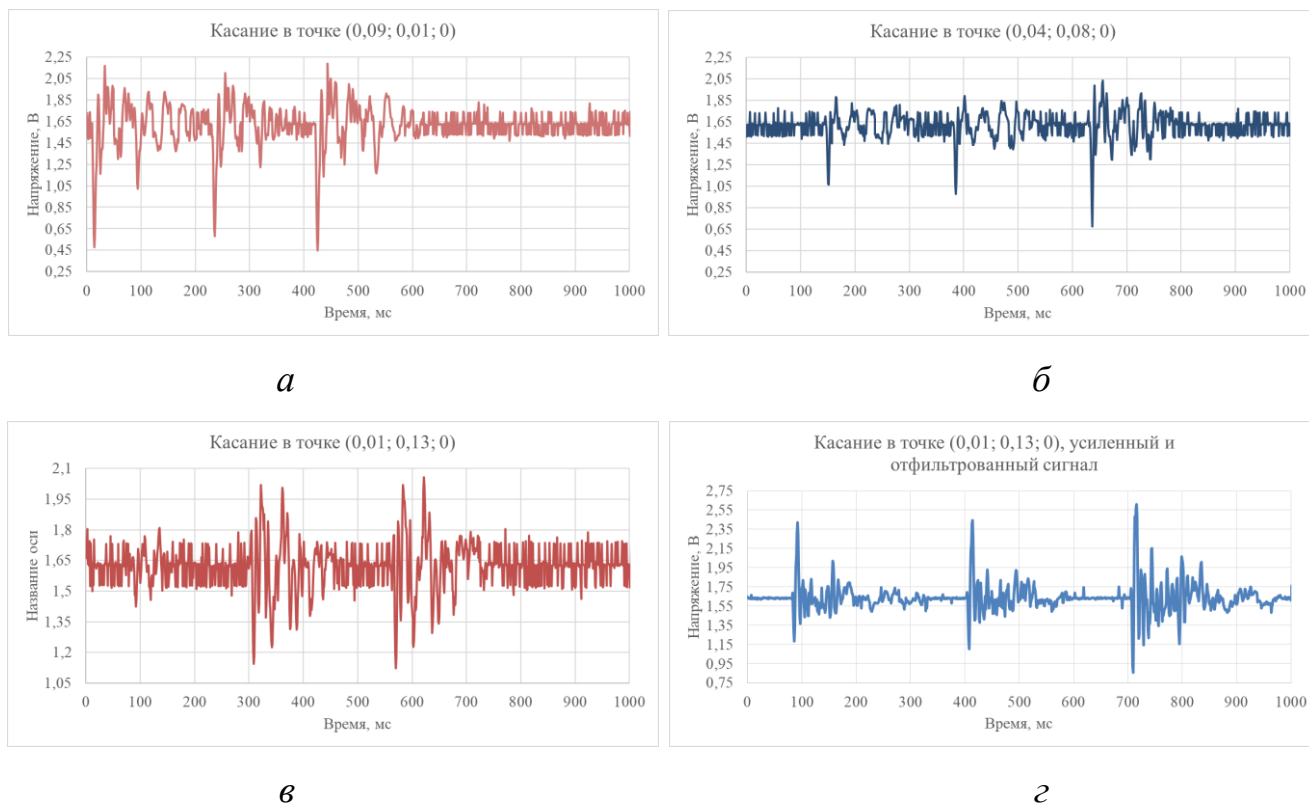


Рисунок 4.3 – Сигналы серии 3 касаний: *а* - касание по координатам (0,09; 0,01; 0), *б* - касание по координатам (0,04; 0,08; 0), *в* - касание по координатам (0,01; 0,13; 0), *г* - касание по координатам (0,01; 0,13; 0) с примененным улучшением сигнала

Этап 2. Этот этап начинается с подбора материала основы сенсорного устройства, с которым будет работать вычислительная система. Как было описано в главе 2.2 скорость распространения звуковой волны разная для каждого материала, и рассчитывается по формуле (2.3). Однако стоит учитывать, что существуют жесткие материалы со свойствами поглощения звука к которым относятся все материалы, составляющей частью которых является пористый наполнитель по типу пемзы, гипса, перлита или вермикулита. Такие материалы способны поглотить почти половину звуковых волн, что приведет к не реализуемости системы.

При функционировании устройства ввода информации в определенной среде, необходимо учитывать то, что не все материалы способны сохранять свою пригодность с течением времени. Так, например, при работе во влажной среде материалы из щелочных и щёлочноземельных металлов или металлов с рыхлой оксидной плёнкой подвергаются воздействию коррозии, что приводит к выходу из строя вычислительной системы и самого устройства.

Следующий шаг – определение конструктивных особенностей. Его выполнение подразумевает выбор формы самого устройства и площади активной части экрана на которое будут нанесены необходимые элементы управления.

Так, например, исходя из предложенного примера нам подойдут такие материалы как: нержавеющая или углеродистая сталь имеющие $V_{зв} = 5039$ и 5177 м/с соответственно, алюминий $V_{зв}$ которого равна 5200 м/с или железо с $V_{зв} = 5000$ м/с. Само устройство будет представлять собой монолитную конструкцию размером: 30 см в ширину, 20 см в длину, 10 см в высоту, внутренне полую, с 2 см толщиной стенок, к внутренней части которой будет прикреплены три регистрирующих устройства и размещена аппаратная часть вычислительной системы, как показано на рисунке 4.4. Такая конструкция обеспечит большую площадь для размещения кнопок, что повлияет и на сами размеры кнопок и вариации их размещения, а также обеспечит достаточный объем пространства для размещения аппаратной части внутри устройства.

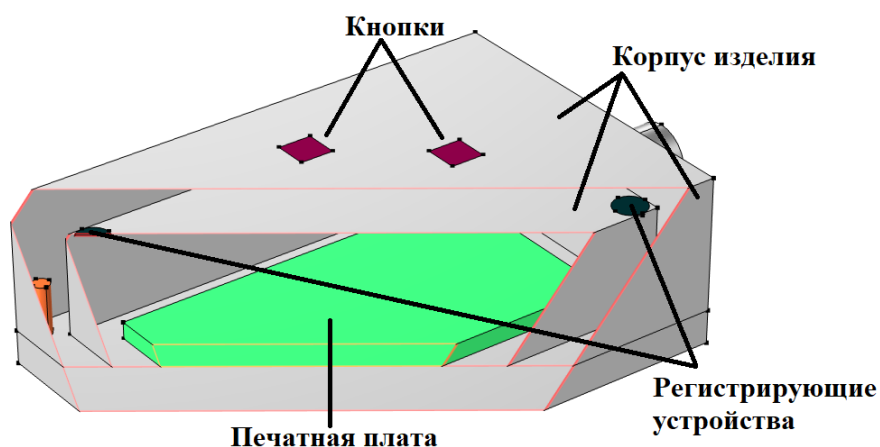


Рисунок 4.4 – Конструкция пульта оператора из примера

Этап 3. Данный этап использует информацию, изложенной в главах 2 и 3. Исходя из выбранных материалов и конструкции устройства необходимо провести компьютерное моделирование различных воздействий возможных при эксплуатации устройства. К основным типам испытаний можно отнести: испытания на климатические воздействия согласно [102], испытания на стойкость к коррозии [103], испытания на стойкость к механическим воздействующим факторам согласно [104]. При отрицательных результатах моделирования, необходимо вернуться к этапу, на котором был выбран материал устройства, и провести повторный анализ возможных для применения материалов. В случае, если результаты моделирования удовлетворяют ожиданиям необходимо перейти к следующему шагу этапа – анализ размещения регистрирующих устройств и кнопок.

Исходя из анализа, проведенного в параграфе 3.4 кнопки (КН) необходимо размещать в активной части экрана, а регистрирующие устройства (М) в неактивной, как показано на рисунке 4.5, б. Это связано с тем, что при локализации места касания у математической модели имеются «слепые зоны», координаты в которых не вычисляются (выделены красным цветом на рисунке 4.5), и для минимизации ошибок локализации кнопки не должны располагаться в них. Для анализа лучших расположений регистрирующих устройств при заданных габаритах можно воспользоваться программой [105].

Выбрав наилучшие размещения регистрирующих устройств и кнопок, необходимо провести моделирование распространения колебаний, создаваемых при касании, как, например, было показано в главе 2.4, с целью анализа необходимых манипуляций с сигналом (усиление или фильтрация). По полученным при моделировании значениям волны, зарегистрированной в точках предполагаемого размещения микрофонов с использованием программной модели [105, 106] необходимо проверить точность расчета координат места касания и сравнить ее с допустимой погрешностью. В случае неудовлетворительных результатов необходимо откорректировать начальное приближение математического аппарата вычислительной системы или изменить расположение

регистрирующих устройств. В случае удовлетворительных результатов необходимо перейти к следующему этапу разработки.

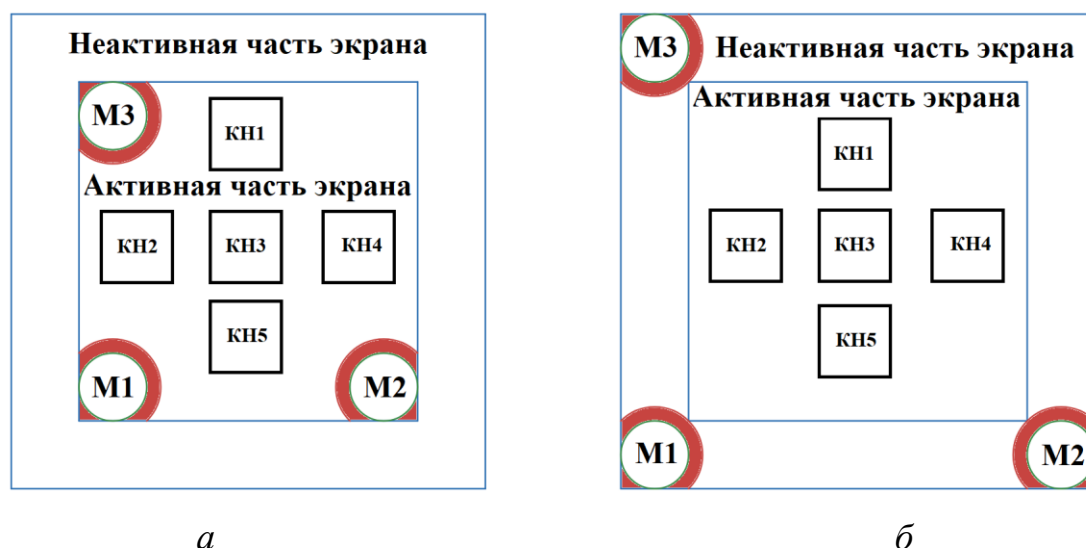


Рисунок 4.5 – Графическое представление размещений регистрирующих устройств под экраном устройства: *а* – размещение в активной части; *б* – размещение в неактивной части

4.4. Структура и состав прикладных этапов метода

Прикладными этапами предложенного метода являются этапы 4-6. Эти этапы в основном сосредоточены на взаимодействии разработчика с физическим экспериментальным образцом вычислительной системы и устройством, в котором она работает.

Этап 4. На данном этапе необходимо, основываясь на данных, полученных на предыдущих этапах, выбрать дискретизацию и разрядность АЦП, подобрать соответствующий микроконтроллер для выполнения расчетов, а также определить параметры входных фильтров и усилителей сигнала.

Ввиду того, что основная работа идет с аналоговыми сигналами, немаловажное значение имеет правильный подбор параметров АЦП. С одной стороны, чем выше разрядность АЦП, тем больше уровней квантования он может различать, с другой стороны высокая разрядность АЦП может привести к

увеличению времени преобразования и задержкам в системе. Еще одной проблемой является использование нескольких каналов одного АЦП [107]. Так как многоканальные АЦП используют выходной мультиплексор для опроса каждого канала, это приводит к уменьшению количества опросов в секунду и задержкам преобразования. Наилучшим выходом из ситуации является использование индивидуальных АЦП для каждого канала, что позволит уменьшить время преобразования и не потерять значения колебаний основы сенсорного экрана вычислительной системой. Зависимость разрешения от частоты дискретизации различных типов АЦП показан на рисунке 4.6 [108]. При выборе разрядности преобразователя необходимо отталкиваться от напряжения, которое на него поступает и необходимой точности преобразования, так, например, аналоговый сигнал, приходящий с измерительных устройств, находится в диапазоне от $-1,5$ В до $+1,5$ В, необходимая точность преобразования должна быть до 3-го знака после запятой. Произведем расчет разрядности АЦП по формуле [109]:

$$m = \lceil \log_2 \left(\frac{U_{\max} - U_{\min}}{\Delta U} + 1 \right) \rceil, \quad (4.1)$$

где m – количество разрядов; $U_{\min}$ – минимальное напряжение, В; $U_{\max}$ – максимальное напряжение, В; ΔU – шаг квантования. Подставив значения из примера в формулу, получаем, что разрядность АЦП должна быть не меньше 12. Для выбора частоты дискретизации АЦП необходимо использовать теорему В. А. Котельникова, согласно которой частота дискретизации должна быть не менее удвоенной максимальной частоты входного сигнала.

Что касается микроконтроллера, который служит основной частью вычислительной системы акустического устройства ввода, его выбор будет определяться такими факторами, как стоимость, разрядность, рабочая частота, объем памяти, напряжение питания и энергопотребление [110, 111].

Микроконтроллеры можно классифицировать по назначению на четыре основные группы [112]: обучающие микроконтроллеры (для начинающих),

универсальные микроконтроллеры, специализированные микроконтроллеры и промышленные микроконтроллеры. Для реализации предложенной вычислительной системы наиболее подходящими являются универсальные микроконтроллеры, такие как STM32, Atmega, АМУР и другие [113]. Выбор этой категории обусловлен тем, что они предлагают оптимальное сочетание не высокой стоимости, универсальности и взаимозаменяемости.

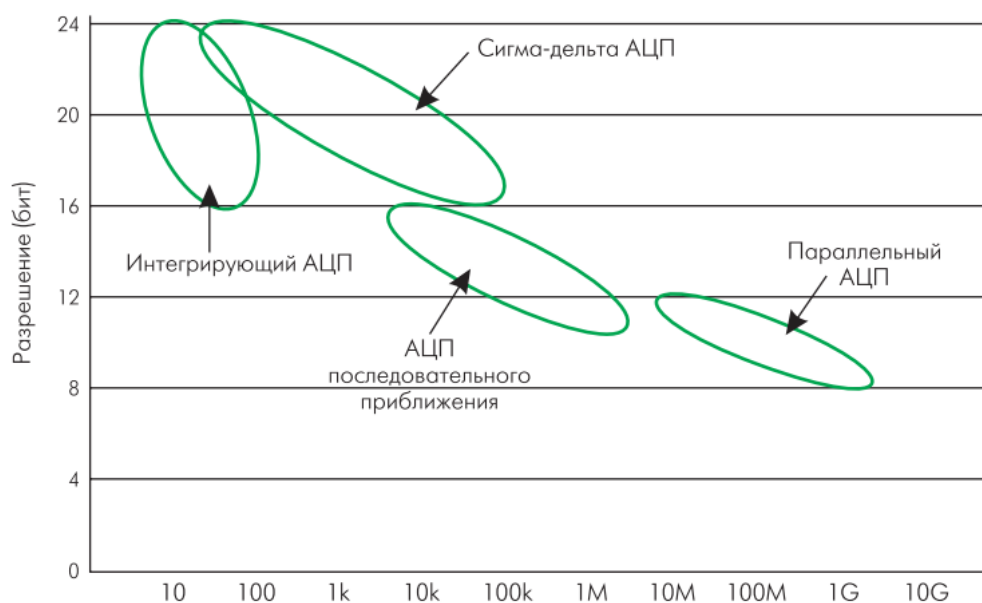


Рисунок 4.6 – Разрешение в зависимости от частоты дискретизации для разных типов АЦП

Еще одним важным аспектом разработки вычислительной системы акустического сенсорного устройства является проектирование входных фильтров и усилителей сигнала. Поскольку вычислительная система должна обрабатывать колебания, распространяющиеся в панели сенсорного устройства, регистрируемый сигнал будет варьироваться в зависимости от материала этой панели и объекта, который вызывает прикосновение.

Например, сигнал, полученный при касании сенсорной основы из стали пальцем, будет иметь более низкую частоту по сравнению с сигналом, зарегистрированным при использовании металлического стилуса. Если предположить, что прикосновение в первом случае было с незначительным

приложением силы, выделить первый экстремум будет довольно сложно без предварительного усиления сигнала. Кроме того, существует проблема высокочастотных помех, возникающих на проводах, которая приводит к тому, что при слабом касании экстремум может находиться в области этих помех. Для решения данной ситуации необходимо разработать высокочастотный фильтр, который будет устранять эту помеху, как например отражено в [114, 115].

Основываясь на том какие параметры будут у предполагаемого элементного базиса разрабатываются программное и техническое обеспечение вычислительной системы, основанное на предлагаемых моделях и способе.

Этап 5. После того как все параметры, необходимые для функционирования устройства и его вычислительной системы, были тщательно подобраны, можно переходить к созданию опытного образца. Однако на этом этапе разработчики могут столкнуться с одной важной проблемой – отсутствием необходимых компонентов на рынке, таких как контроллеры или АЦП.

Несмотря на широкий ассортимент радиоаппаратуры, доступной на рынке [116], выбор подходящих компонентов может вызвать трудности. Чтобы преодолеть эту проблему, важно провести анализ параметров доступных аналогов. Если результаты анализа окажутся неудовлетворительными, потребуется пересмотреть исходные параметры, чтобы обеспечить успешное функционирование вычислительной системы.

В зависимости от приобретённого контроллера разрабатывается программное обеспечение, основанное на предложенных моделях, способе, алгоритмах позиционирования точки касания.

Этап 6. Заключительный этап метода, который позволяет проверить, насколько устройство и вычислительная система соответствует изначально заданным параметрам и требованиям. В свою очередь его можно разделить на следующие шаги:

Проведение испытаний. Испытания должны быть организованы в соответствии с заранее установленными критериями, которые могут включать в

себя функциональные тесты, тесты на производительность и точность исполнения команд, а также проверки на надежность и устойчивость к внешним воздействиям;

Анализ результатов. Если в ходе испытаний будут получены отрицательные результаты, это станет сигналом для более глубокого анализа. Важно определить, какие именно компоненты системы могли повлиять на негативные исходы. Это может потребовать детального изучения каждого элемента системы, чтобы выявить возможные неисправности, несоответствия и недоработки;

Установление причин. После идентификации проблемных компонентов необходимо установить причины их некорректной работы. Это может быть связано с неправильной конфигурацией, несовместимостью с другими элементами системы, ошибки в конфигурировании, например, контроллера, или даже с производственными дефектами.

Коррекция модели. На этом этапе разработчики должны вернуться к шагу анализа, где был выбран проблемный компонент. Важно пересмотреть его характеристики и возможности, а также оценить, как они соотносятся с текущими требованиями и условиями. На основе полученной информации следует внести необходимые изменения, чтобы вернуть функционирование вычислительной системы.

4.5. Алгоритм применения предложенного метода разработки вычислительной системы акустических сенсорных устройств

Для более наглядного и практического применения метода был разработан комплексный алгоритм, показанный на рисунке 4.7, который структурирует процесс разработки и связывает каждое действие разработчика с предыдущими и последующими шагами. Этот алгоритм можно условно разделить на шесть этапов, каждый из которых включает ключевые моменты, позволяющие более качественно подойти к разработке. Каждый этап не только отражает последовательность действий, но и включает в себя рекомендации и лучшие практики, что делает процесс более прозрачным и понятным.

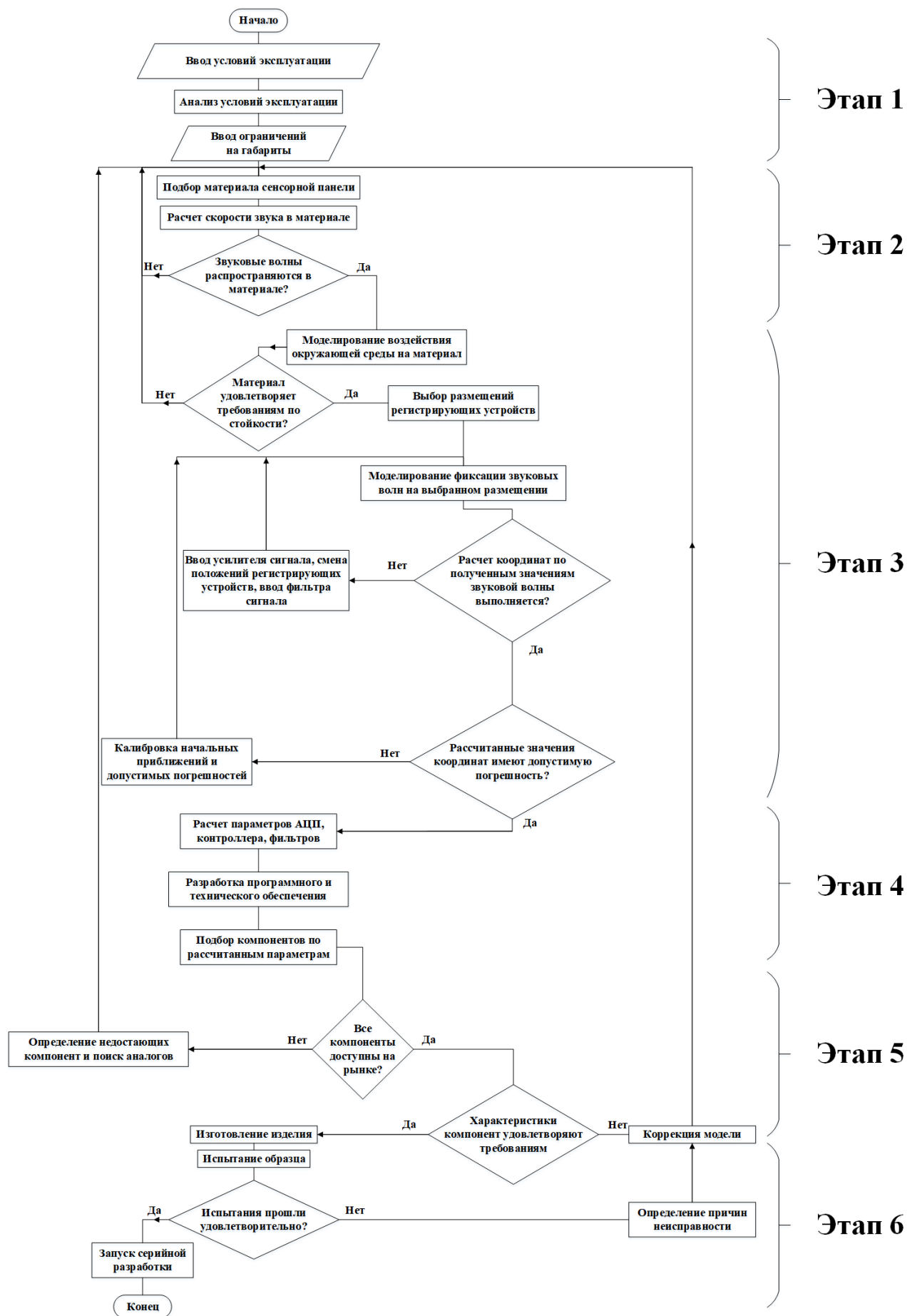


Рисунок 4.7 – Алгоритм применения метода

Алгоритм охватывает все аспекты создания устройства и вычислительной системы с нуля, начиная с анализа условий эксплуатации и заканчивая тестированием готового продукта. Он учитывает ключевые проблемы, с которыми может столкнуться разработчик на различных стадиях проектирования и реализации.

4.6. Выводы по главе

В данной главе подробно рассмотрены различные методы проектирования акустических сенсорных устройств ввода и их вычислительных систем. Проанализированы как положительные, так и отрицательные стороны каждого из подходов, что позволило получить более полное представление о текущем состоянии в этой области.

Предложен новый метод разработки акустических сенсорных устройств и их вычислительных систем. Этот метод основан на специально разработанном способе и математической модели локализации места касания, что позволяет значительно повысить эффективность, точность и простоту работы таких устройств. Процесс разработки включает в себя шесть этапов, которые можно условно разделить на аналитические и прикладные. Аналитические этапы сосредоточены на теоретическом обосновании и моделировании, в то время как прикладные этапы включают в себя практическую реализацию и тестирование разработанных решений.

Кроме того, был разработан алгоритм к предложенному методу, который позволяет создать устройство и вычислительную систему с нуля. Этот алгоритм охватывает ключевые проблемы, с которыми может столкнуться разработчик на различных этапах проектирования и реализации. В частности, он учитывает вопросы выбора компонентов, оптимизации процессов обработки сигналов и обеспечения надежности работы системы в реальных условиях эксплуатации. Такой подход значительно упрощает процесс разработки и повышает шансы на успешную реализацию проекта.

5. Апробация и внедрение результатов диссертационного исследования на предприятии и в учебном процессе

5.1. Апробация и внедрение на предприятии ПАО «ПНППК»

5.1.1. Описание объекта внедрения

ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (ПНППК) занимается разработкой и производством датчиков и систем для навигации, стабилизации и ориентации подвижных объектов. Компания имеет развитую научную и исследовательскую базу для производства различного типа волокон и волоконно-оптических компонентов. ПНППК, как один из ключевых участников консорциума, сегодня считается ведущим российским предприятием в области фотоники, а особенностью работы Компании остается создание конечных высокотехнологичных продуктов, их масштабирование и вывод на российский и мировой рынок. В настоящее время Компания представляет собой холдинг из 9 заводов, научно-исследовательского института радиофотоники и оптоэлектроники, научно-технического, инженерно-технического, образовательного и испытательного центров и 10 дочерних компаний.

В состав изготавливаемых навигационных систем входят пульта управления, выполняющие функции ввода команд оператором. Пульта управления предназначены для функционирования в таких условиях эксплуатации, как море, открытый воздух, пустыня, туман, дождь и т.д. Использование в сложных условиях вызывает постоянную необходимость их улучшения, так как кнопки, которые в них используются имеют высокую стоимость и быстрый износ.

5.1.2. Анализ требований и качественных результатов внедрения

На данный момент в пультах управления, изготавливаемых ПАО «ПНППК», для ввода информации используются пленочные клавиатуры. Их

функционирование заключается в том, что при нажатии на кнопку на короткое время замыкается ключ, через который подается уровень напряжения на определенный управляющий вход контроллера. При эксплуатации такого типа устройств ввода в сложных условиях выявлено, что у них стираются кнопки и выходят из строя ключи, а замена и ремонт являются дорогостоящими.

Внедрение устройства ввода, основанном на предложенной вычислительной системе, позволит устранить описанные проблемы при этом улучшив характеристики пультов управления, отражённые в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Требования к устройству ввода пульта управления

№	Требование	С механической пленочной клавиатурой	С акустическим сенсорным экраном
1	Нажатий на одну кнопку	Не менее 1000000	∞
2	Полный ресурс	Не менее 10000 ч	Не менее 15000 ч
3	Дребезг кнопки	Не более 0,3 с	Не более 0,1 с

Улучшение описанных параметров связано с тем, что меняется физический принцип действия используемых устройств ввода. Для гарантированного функционирования пульта управления с внедряемым устройством необходимо подобрать такие компоненты для него, которые способны сохранять работоспособность согласно выдвигаемым требованиям к пультам управления:

- Величина усилия нажатия на кнопку от 0,5 до 2 Н;
- Сохраняет работоспособность при воздействии и не реагирует на однократный удар с ускорением 150 м/с^2 , длительностью 5-15 мс;
- Сохраняет работоспособность при воздействии и не реагирует на многократный удар с ускорением 15 м/с^2 , длительностью 1 - 5 мс, 20 ударов
- Сохраняет работоспособность в температурном диапазоне от -40 до $+70$ °С
- Сохраняет работоспособность при влажности более 95% при температуре $+40$ °С

5.1.3. Техническое обеспечение разработанной вычислительной системы

Для реализации предложенной вычислительной системы для пультов управления в качестве сенсорной основы устройства выступает его корпус из стали марки СТЗСП5. Габариты активной части экрана: $16 \times 6 \times 0,3$ см. В качестве регистрирующих устройств использовались пьезоэлектрические диафрагмы 2CFT-9T-18,0A1-P+ прикрепленные к внутренней части корпуса изделия путем нанесения клея ВК-53. В качестве вычислительного элемента был применен микроконтроллер STM32F401RE. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой использованы микросхемы с 8 битным АЦП AD7904BRUZ. Для устранения высокочастотной помехи и выбросов напряжения разработан входной фильтр, показанный на рисунке 5.1. Структурную схему вычислительной системы можно увидеть на рисунке 5.2

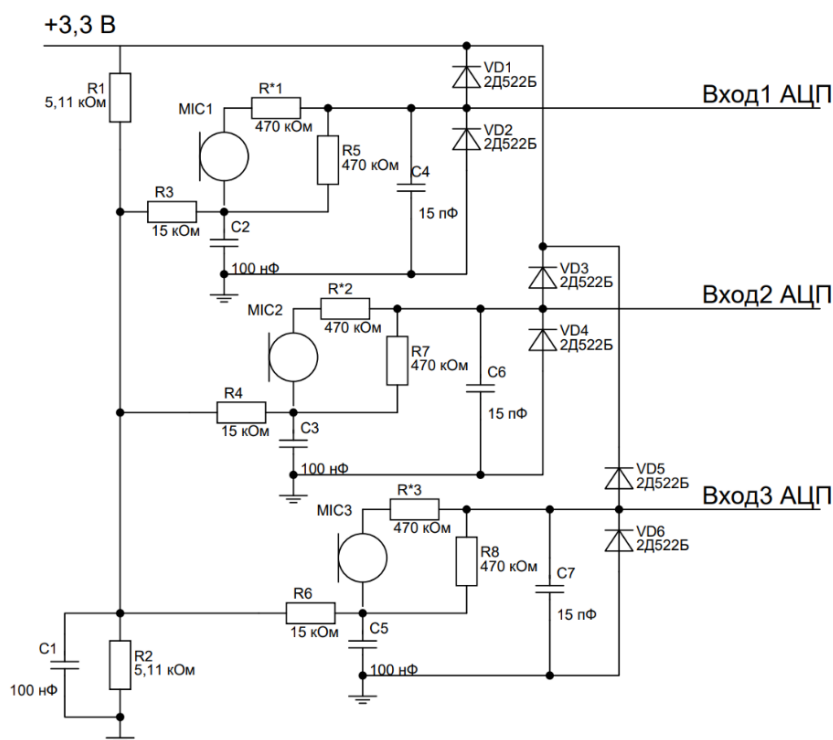
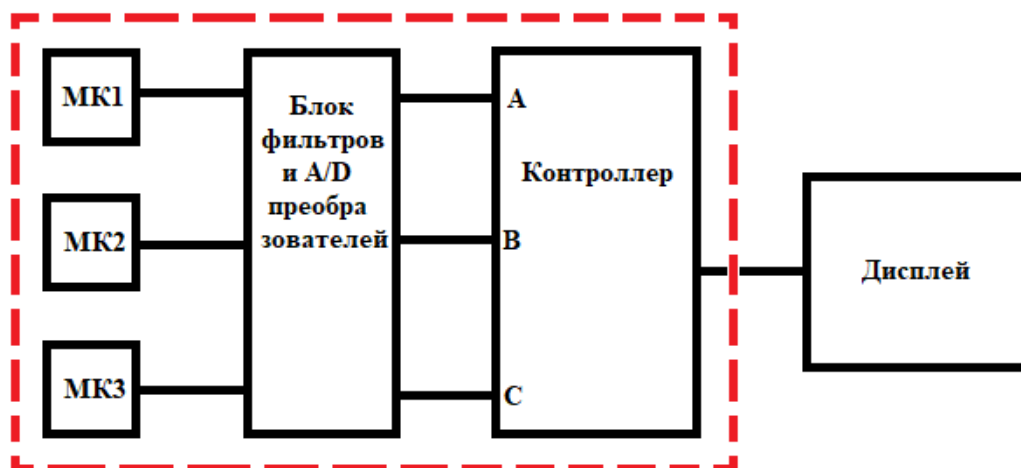


Рисунок 5.1 – Входной фильтр



Условные обозначения:

МК1, МК2, МК3 - регистрирующие устройства

А, В, С - порты общего назначения ввода вывода

— — — — — - структура вычислительной системы

Рисунок 5.2 – Структурная схема вычислительной системы

5.1.4. Алгоритмическое обеспечение разработанной вычислительной системы

Для определения местоположения касания вычислительной системой была написана программа для контроллера на языке С. Функционирование программы можно разделить на четыре блока: сканирование, запись, поиск экстремума и вычисление координаты касания.

При включении пульта управления контроллер запускает процесс непрерывного опроса регистрирующих устройств каждую 1 мкс. Благодаря разработанному фильтру нулевой сигнал находится в диапазоне $1,65 \pm 0,025$ В. Когда на один из входов поступает значение, превышающее диапазон нулевого сигнала, инициализируется запись последующих 300 значений с регистрирующих устройств в массив.

После заполнения массива запускается функция поиска экстремума, которая находит индексы первых экстремумов среди всех значений массива для каждого столбца, который соответствует определённому регистрирующему устройству. Затем из полученных значений индексов находится минимальный, после чего рассчитываются известные расстояния и записываются в память.

Следующим шагом запускается функция расчёта места касания, основанная на предложенной математической модели. После того как неизвестные значения места касания будут рассчитаны, запускается процесс сопоставления полученной координаты с координатами кнопок. В случае если полученные значения не относятся ни к одной кнопке, все записанные значения обнуляются для последующей перезаписи и возобновляется процесс ожидания превышения уровня нулевого сигнала. В противном случае отправляется команда, которая соответствует кнопке, касание в диапазоне которой было произведено, и происходит такое же обнуление всех значений. Алгоритм работы программы можно увидеть на рисунке 5.3.

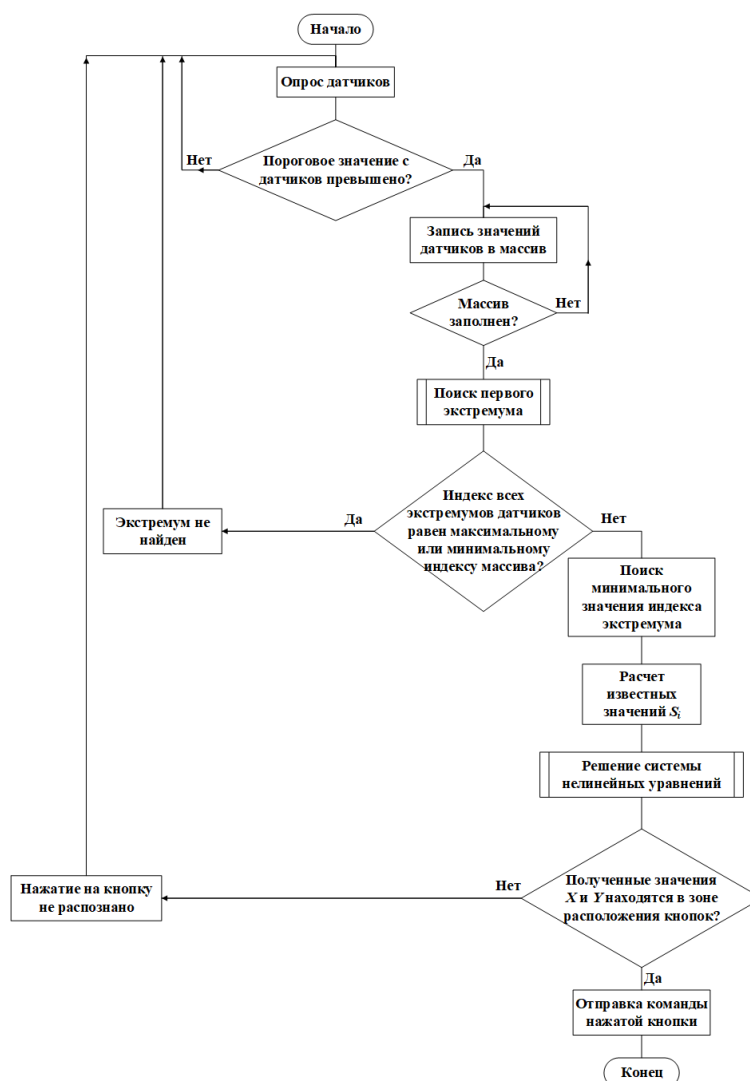


Рисунок 5.3 – Алгоритм работы программы вычислительной системы сенсорного устройства ввода пульта управления

5.1.5. Программное обеспечение вычислительной системы

Для работы вычислительной системы был создан метод определения момента времени первого экстремума. Предлагаемый метод позволяет определить первый экстремум или отсутствие такового. Для этого задается условие (константа – разница между текущим и предшествующим значением), по которому изменение (рост или спад) считается существенным. Алгоритм сначала позволяет определить направление изменения (рост или спад). Затем определяется продолжение изменения до его прекращения (экстремум или отсутствие такового). Точка экстремума определяется также с соблюдением условия о том, что прекращение изменения существенно (больше заданной константы), что позволяет избежать малых изменений и более качественно определить искомую точку как показано на рисунке 5.4. Алгоритм работы метода показан на рисунке 5.5 а листинг программы поиска экстремума отражен в приложении Е.

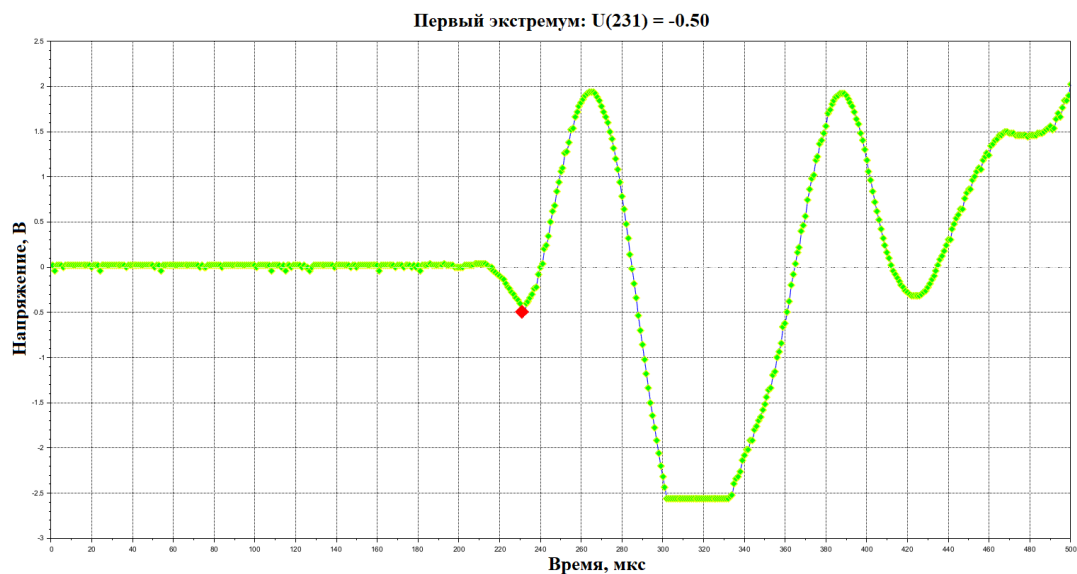


Рисунок 5.4 – Визуализация работы функции

Полученные значения из функции экстремума используются в функции для нахождения неизвестной точки координат. Для начала алгоритм рассчитывает значения всех частных производных используя заранее записанные положения

регистрирующих устройств и начальные приближения для всех неизвестных. Используя полученные значения частных производных, рассчитывается матрица Якоби, а затем и корректирующие значения начальных приближений неизвестных. Расчет корректирующего значения продолжается до тех пор, пока количество итераций не будет больше 20 или корректирующее значение всех неизвестных будет менее 0,01. Алгоритм работы функции расчета неизвестной координаты показан на рисунке 5.6.

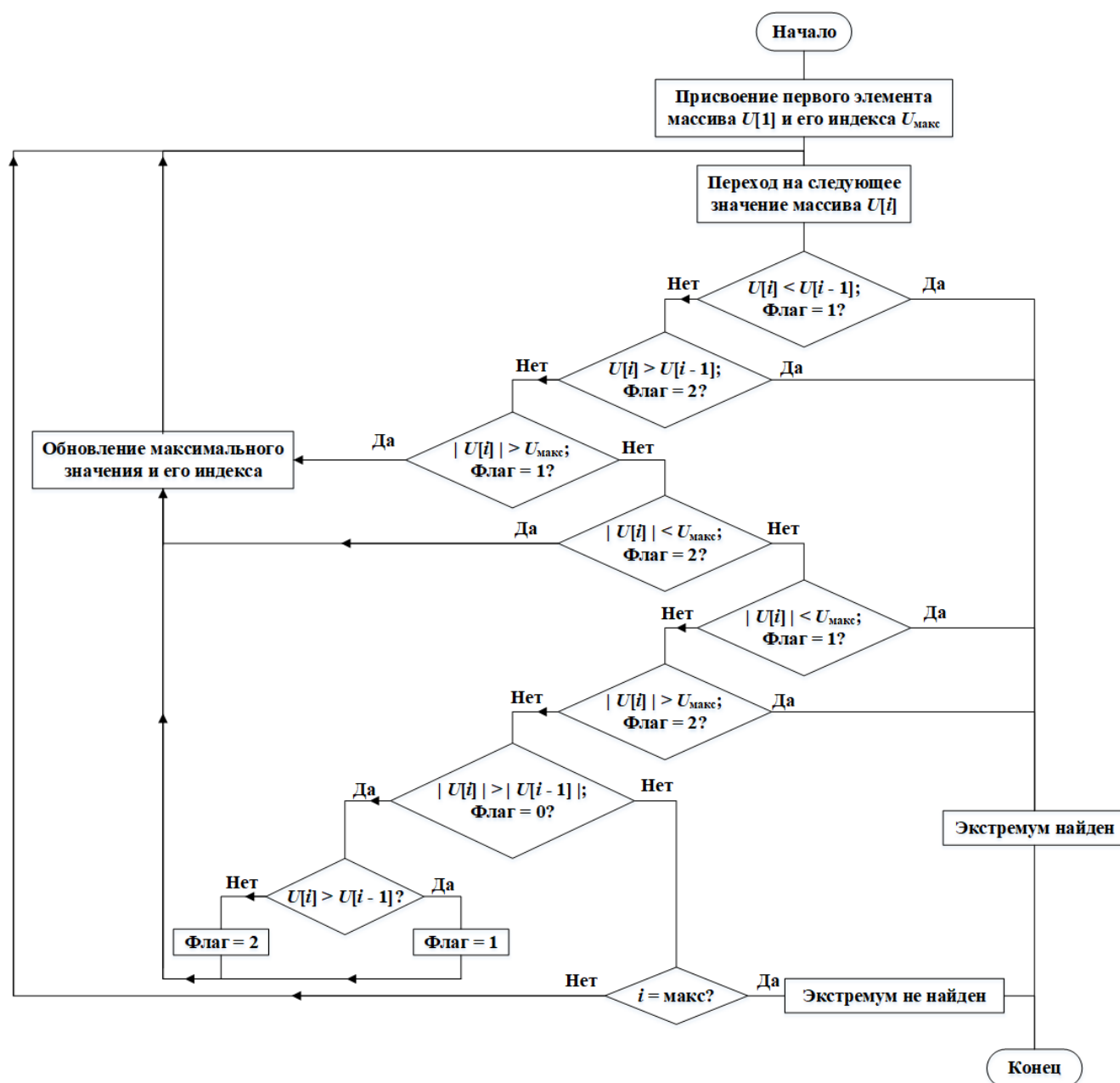


Рисунок 5.5 – Алгоритм определения экстремума

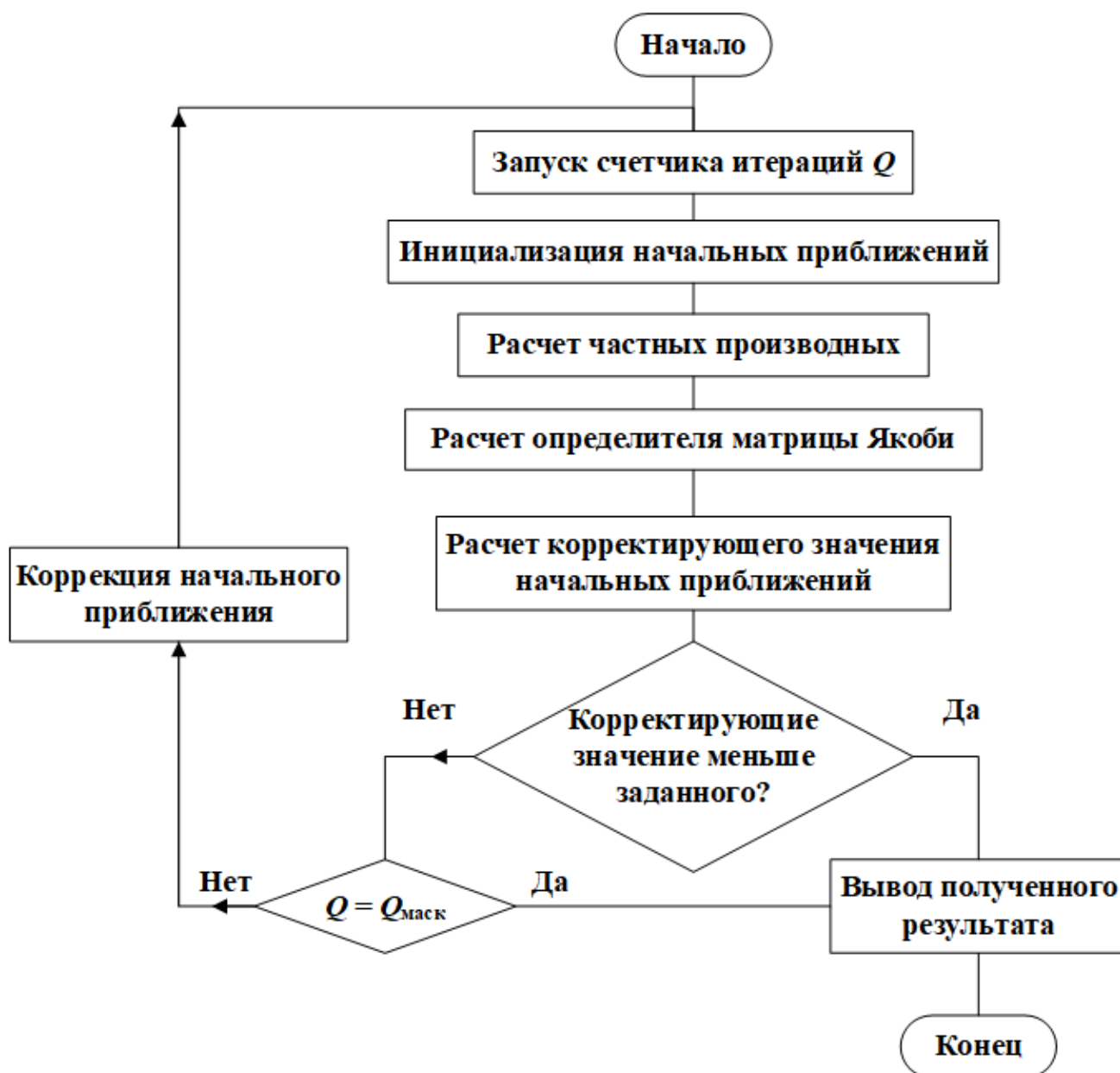


Рисунок 5.6 – Алгоритм расчета неизвестной точки касания

5.1.6. Условия и результаты внедрения

Пульт управления с применённой вычислительной системой содержит пять кнопок управления. Для проверки работоспособности разработанной вычислительной системы в составе пульта управления проведены испытания на её функционирование и работоспособность в нормальных климатических условиях (НКУ) при воздействии внешних факторов (ВВФ).

Испытания на функционирование:

- проверка усилия нажатия кнопок. Для оценки чувствительности срабатывания вычислительной системы проведены испытания на минимальное значение прикладываемого усилия. По результатам выявлено, что усилие лежит в диапазоне 0,5 – 2 Н, что соответствует текущему допуску;

- проверка срабатывания кнопок. Нажатие на кнопку должно инициализировать команду, назначенную ей. Результаты многократных нажатий на кнопку приведены в таблице 5.2 и являются положительными;

Таблица 5.2 – Результаты срабатывания кнопок

Кнопка	«Вверх»	«Вниз»	«Увеличить яркость»	«Уменьшить яркость»	«Ввод»
Количество срабатываний, %	99	97	99	96	100

- проверка дребезга кнопки. При нажатии на кнопку дребезг контактов предложенной вычислительной системы подразумевает время, затрачиваемое на вычисление места касания и затухание колебаний, вызванных касанием. По результатам проверок выявлено, что максимальное значение дребезга кнопки составляет 15 мс, что является меньшим значением, чем текущий допуск;

Испытания на ВВФ:

- проверка воздействия механических ударов. Функционирование вычислительной системы должно сохраняться и отсутствовать ложные срабатывания при воздействии механических ударов одиночного и многократного действия с пиковым ударным ускорением 150 м/с^2 и длительностью от 5 до 15 мс для однократного удара, а также с пиковым ударным ускорением 15 м/с^2 , длительностью от 1 до 5 мс и количеством ударов, равным 20, для многократного. Результат проверки положительный: вычислительная система функционирует;

- проверка воздействия повышенной и пониженной температуры окружающей среды. Функционирование вычислительной системы должно

сохраняться при работе в температурном диапазоне от -40 до +70 °С. Результат проверки положительный: вычислительная система функционирует;

- проверка на воздействие повышенной влажности воздуха. Функционирование вычислительной системы должно сохраняться при повышенной относительной влажности до 95 % при температуре +40 °С. Результат проверки положительный.

5.2. Апробация и внедрение в учебный процесс ФГАОУ ВО «ПНИПУ»

Разработанные способ и модели определения места касания вычислительной системой, а также метод разработки вычислительных систем сенсорных устройств ввода информации были применены в учебном процессе ФГАОУ ВО «ПНИПУ» для направлений подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника», 27.03.04 «Управление в технических системах». Результаты были использованы в следующих дисциплинах:

1. «Программирование и основы алгоритмизации». Разработанные программные модели и алгоритмы позволили расширить инструментарий, рассматриваемый на занятиях, что дало студентам возможность получить больший опыт в построении алгоритмов для разработки приложений и написании программ на языках С и С++.

2. «Численные методы». Разработанные математические и программные модели для решения систем нелинейных уравнений позволили научить студентов оценивать работоспособность различных подходов к решению таких уравнений.

3. «Цифровая обработка сигналов». Разработанный способ локализации позволил студентам научиться анализировать различные сигналы, фильтровать их и находить экстремумы.

4. «Встроенные микропроцессорные системы». Предложенный метод разработки вычислительных систем сенсорных устройств ввода информации позволил студентам получить практические навыки программирования в

современных микроконтроллерах, а работы с внешними устройствами (АЦП, фильтры микрофоны и т. п.).

5.3. Выводы по главе

В главе представлены результаты апробации и внедрения предложенных способа, моделей и метода на промышленном предприятии ПАО «ПНППК» и в учебном процессе ФГАОУ ВО «ПНИПУ».

Для ПАО «ПНППК» был проведен анализ текущих требований к сенсорным устройствам ввода информации, создан опытный образец пульта управления, использующий предложенную вычислительную систему, а также разработано техническое, алгоритмическое и программное обеспечение для него. Проведены испытания на опытном образце. По результатам проведенных испытаний получен акт внедрения результатов диссертационного исследования.

Для ФГАОУ ВО «ПНИПУ» предложен алгоритмический и программный инструментарий для повышения уровня освоения профессиональных компетенций и их компонентов студентами вуза в рамках профильных учебных дисциплин. Положительный эффект подтвержден актом внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертационная работа посвящена решению важной научно-технической проблемы – улучшению эксплуатационно-технических характеристик вычислительных систем и их элементов в сенсорных устройствах ввода информации, использующих акустические колебания, вызываемые в подложке устройства при взаимодействии пользователя с ней.

В рамках проведенного исследования получены следующие основные результаты:

1. В процессе анализа моделей, методов и инструментов реализации вычислительных систем сенсорных устройств ввода информации и требований к ним выявлены специфика и недостатки существующих решений, а также описано предполагаемое решение.

2. Предложен и исследован способ идентификации места касания с помощью звуковых волн, распространяющихся по экрану (подложке) сенсорного устройства ввода информации. Этот метод основывается на том, что для определения местоположения касания достаточно иметь информацию о скорости распространения колебаний, местоположении регистрирующих устройств и времени первого экстремума зарегистрированных колебаний. Такой подход позволяет значительно упростить процесс локализации, повысить его быстродействие и снизить сложность, что является важным аспектом при разработке высокоэффективных вычислительных систем сенсорных устройств ввода информации.

3. Разработаны математические и программные модели определения точки касания, реализуемые в вычислительной системе акустических сенсорных устройств ввода информации. Доказано отсутствие аналитического (единственного) решения математической модели. Разработанная численная модель позволяет локализовать место касания с минимальными затратами вычислительных ресурсов, и имеет гибкую настройку (расположения микрофонов, точность, габариты и пр.).

4. Разработан метод проектирования вычислительной системы сенсорного устройства ввода информации на основе акустических измерительных преобразователей. Метод базируется на предложенном в работе способе и математической модели локализации места касания, что позволяет значительно повысить эффективность, точность и быстродействие работы подобных устройств. Процесс разработки включает в себя шесть этапов, которые можно разделить на аналитические и прикладные.

5. Апробированы и внедрены результаты диссертационного исследования на производственном предприятии и учебном процессе.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в улучшении качественных и эксплуатационных характеристик вычислительной системы устройств ввода информации, что подтверждается актами внедрения.

Список литературы

1. Толокнов, А. Мы особенные: устройства ввода информации для промышленного применения / А. Толокнов // Современные технологии автоматизации. – 2010. – №. 3. – С. 26-33.
2. Singh, G. Touch screen driving: A novel and efficient design for automation / G. Singh // 2014 World Automation Congress (WAC). 2014. P. 634-638. DOI: 10.1109/WAC.2014.6936074.
3. Avutu, S.R. Design of touch screen based robot with obstacle detection module for autonomous path navigation / S.R. Avutu, D. Bhatia, B.V. Reddy // TENCON 2017-2017 IEEE Region 10 Conference. 2017. P. 2127-2131. DOI: 10.1109/TENCON.2017.8228212.
4. Штрапенин, Г. Интегральные контроллеры сенсорных экранов Texas Instruments / Г. Штрапенин, М. Мишан // Компоненты и технологии. – 2007. – № 9(74). – С. 64-68.
5. Walker, G. A review of technologies for sensing contact location on the surface of a display / G. A. Walker // Journal of the Society for Information Display. – 2012. – №. 20(8). P. 413-440. DOI: 10.1002/jsid.100.
6. Kozin, A. Contact Spot on a Display Surface / A. Kozin, E. Zalesskiy, A. Iakubchik, I. Iakubchik // Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022, St. Petersburg, 25–28 january 2022. – St. Petersburg, 2022. – P. 349-351. – DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755516.
7. Козин, А.В. Сенсорное устройство ввода информации на основе акустических измерительных устройств / А. В. Козин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 46. – С. 178-195. – DOI: 10.15593/2224-9397/2023.2.08.
8. Козин А.В. Разработка и исследование вычислительной системы акустического сенсорного устройства ввода информации [Электронный ресурс] / А.В. Козин, В.И. Фрейман // Инновационные технологии: теория, инструменты,

<https://innotech.pstu.ru/docs/files/articles/section1/docx/%D0%9A%D0%BE%D0%B7%D0%B8%D0%BD%D0%90%D0%9229.docx>

9. Вихрев, Л. Легким движением руки: сенсорные панели / Л. Вихрев // Компоненты и технологии. – 2005. – № 5(49). – С. 70-76.

10. Карпушова, В.Е. Технологии сенсорных экранов / В.Е. Карпушова // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Таганрог, 04 ноября 2020 года. – Стерлитамак: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований". – 2020. – С. 158-159.

11. Карпушова, В.Е. Технологии сенсорных экранов / В.Е. Карпушова // 72-я Международная студенческая научно-техническая конференция: Материалы конференции, Астрахань, 18–23 апреля 2022 года. – Астрахань: Астраханский государственный технический университет. – 2022. – С. 442-443.

12. Глотова, И.Ю. Сенсорные экраны / И.Ю. Глотова, Е.И. Германович // Актуальные проблемы энергетики: материалы 73-й научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Минск: БНТУ. – 2017. – С. 857-862.

13. Синь, Я. Анализ технологии и процесса разработки отображения мобильных телефонов / Я. Синь // Наука настоящего и будущего. – 2018. – Т. 1. – С. 282-284.

14. Гаврилюк, С. Советы по контроллерам сенсорных экранов / С. Гаврилюк // Компоненты и технологии. – 2004. – № 2(37). – С. 60-65.

15. Шебанин, А.С. Исследование и разработка стационарной системы многопользовательского взаимодействия / А.С. Шебанин // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского: Материалы конференции, Москва, 17–29 февраля 2016 года. – Москва: Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ. – 2016. – С. 364-366.

16. Подмарева, Е.В. Технологии изготовления сенсорных экранов интерактивных столов / Е.В. Подмарева, М.Ю. Бычкова, О.М. Шарунова //

Робототехника и системный анализ: создание и исследование информационных моделей. Том 2. – Пенза: Пензенский государственный технологический университет. – 2016. – С. 53-60.

17. Кокорев, А.С. Анализ применимости сенсорных экранов / А.С. Кокорев, Д.С. Терентьев // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2024. – Т. 2. – С. 103-116.

18. Клейменов, А.А. Построение инфракрасных мультитач сенсорных панелей / А.А. Клейменов // Компьютерные системы и сети: 55-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-26 апреля 2019 г. – Минск, 2019. – С. 267–269.

19. Рябов, А.Р. Экран на поверхностно-акустических волнах / А.Р. Рябов, В.М. Машков // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник». – Екатеринбург. – 2017. – С. 145–146.

20. Денисов, С.А. Методические подходы к выбору сенсорных технологий для ситуационных центров на основе классификации видов деятельности пользователей / С.А. Денисов, А.А. Зацаринный, В.А. Кондрашев, К.Г. Чупраков // Системы и средства информатики. – 2012. – Т. 22, № 2. – С. 79-94.

21. Шурыгина, М. Малые и средние дисплеи. Активное продвижение на рынок / М. Шурыгина // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2010. – № 6(104). – С. 46-53.

22. Патент № 2607617 С1 Российская Федерация, МПК G06F 3/02. Сенсорная клавиатура на поверхностных акустических волнах: № 2015136173: заявл. 26.08.2015: опубл. 10.01.2017 / Ю. С. Кольцов, М. В. Меш, И. Г. Анцев [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "НИКОЛЬ", Открытое Акционерное Общество "Научно-производственное Предприятие "Радар ммс".

23. Liu, Y. Acoustic wave approach for multi-touch tactile sensing / Y. Liu, J.-P. Nikolovski, M. Hafez, N. Mechbal M. Vergé // 2009 International Symposium on Micro-

NanoMechatronics and Human Science. – IEEE, 2009. – С. 574-579. DOI: 10.1109/MHS.2009.5351748.

24. Kang, K.C. Feasibility study on multi-touch ultrasound large-panel touchscreen using guided lamb waves / K.C. Kang, Y.H. Kim, J.Y. Pyun, K.K. Park // Measurement. – 2022. – Т. 190. – С. 110755. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.110755.

25. Патент № 2543311 С2 Российская Федерация, МПК G06F 3/043. Безрамочное акустическое сенсорное устройство : № 2012145348/08: заявл. 15.03.2011: опубл. 27.02.2015 / Е. Танака, Т. Гао, Д. К. Кент [и др.] ; заявитель Элу Тач Солюшнз, Инк., Тач Пэнел Системз К.К.

26. Tanaka, Y., Gao T., Kent J.C., Haller J.T., Scharff D.H., Avery T.O. Bezel-less acoustic touch apparatus : пат. 8576202 США. – 2013.

27. Quaegebeur, N. Touchscreen surface based on interaction of ultrasonic guided waves with a contact impedance / N. Quaegebeur, P. Masson, N. Beaudet, P. Sarret // IEEE Sensors Journal. – 2016. – Т. 16. – №. 10. – С. 3564-3571. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2535386.

28. Liu, Y. et al. An acoustic multi-touch sensing method using amplitude disturbed ultrasonic wave diffraction patterns / Y. Liu, J.P. Nikolovski, N. Mechbal, M. Hafez, M. Vergé // Sensors and Actuators A: Physical. – 2010. – Т. 162. – №. 2. – С. 394-399. DOI: 10.1016/j.sna.2010.03.020.

29. Thompson, B. R. et al. Active acoustic sensing for determining touch location on an elastic surface / B.R. Thompson, T. DiPassio, J. Rutowski, M.F. Bocko, M.C. Heilemann // Journal of Sound and Vibration. – 2025. – Т. 594. – Р. 118667. DOI: 10.1016/j.jsv.2024.118667.

30. Zhang, H. L. Simplified Mechanical Design for an Acoustic Touch Screen: заяв. пат. 12750321 США. – 2011.

31. Benard, D.J., Addison, R. C., Gu, D. F. Touch screen: пат. 6741237 США. – 2004.

32. Tsumura, M., Fujita, N. Acoustic wave type touch panel: пат. 7920133 США. – 2011.

33. Zhang H.L. Touchscreen system with simplified mechanical touchscreen design using capacitance and acoustic sensing technologies, and method therefor: пат. 9285929 США. – 2016.
34. Long D.H. Touch screen system with acoustic and capacitive sensing: заяв. пат. 12980810 США. – 2011.
35. Tanaka, Y., Kent, J., Roney, J. Acoustic wave touch detecting apparatus: пат. 7204148 США. – 2007.
36. Reju, V.G. Localization of taps on solid surfaces for human-computer touch interfaces / V.G. Reju, A.W. H. Khong A.B. Sulaiman // IEEE transactions on multimedia. – 2013. – Т. 15. – №. 6. – P. 1365-1376. DOI: 10.1109/TMM.2013.2264656.
37. 3M. Dispersive Signal Touch Technology Profile [Электронный ресурс]/ 3M // DST-WHTPAPER-0407; 3M. – 2007. Режим доступа: <https://studyres.com/doc/14161682/dispersive-signal-touch-technology?ysclid=m8na6r5glw640811709#>
38. Hardie-Bick, A.R. Touch pad: заяв. пат. 2267582 США. – 2010.
39. Linotte, J.M., Chaine, S., Jean, G. Touch control system and method for localising an excitation: заяв. пат. 12668225 США. – 2010.
40. Kiri, R. In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process [Электронный ресурс] / R. Kiri, N. Quieffin, S. Catheline, M. Fink // Applied Physics Letters. – 2005. – №. 87(20). DOI: 10.1063/1.2130720. Режим доступа: https://userpages.irap.omp.eu/~sbottinelli/Downloads/BE_3_HING_LocalizationFingerImpacts.pdf
41. Reis, S. Touchscreen based on acoustic pulse recognition with piezoelectric polymer sensors / S. Reis, V. Correia, R.M. Sousa, M. Martins, G. Barbosa, G. Minas, S. Lanceros-Mendez, J.G. Rocha // 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – IEEE, 2010. – P. 516-520. DOI: 10.1109/ISIE.2010.5637672.
42. Sun K. Vskin: Sensing touch gestures on surfaces of mobile devices using acoustic signals / K. Sun, T. Zhao, W. Wang, L. Xie // Proceedings of the 24th annual international conference on mobile computing and networking. – 2018. – P. 591-605. DOI: 10.1145/3241539.3241568.

43. D'souza, H.M. Method and system for calibrating an acoustic touchscreen: пат. 8493332 CIIA. – 2013.

44. Nikolovski, J.P. Lamb-wave (x, y) giant tap screen panel with built-in microphone and loudspeaker / J.P. Nikolovski, // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2013. – Т. 60. – №. 6. – P. 1178-1191. DOI: 10.1109/TUFFC.2013.2680.

45. Byanjankar, A. S-ubitap: Leveraging acoustic dispersion for ubiquitous and scalable touch interface on solid surfaces / A. Byanjankar, Y. Liu, Y. Shu, I. Shin, M. Choi, H. Kim // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2022. – Т. 22. – №. 11. – P. 6800-6816. DOI: 10.1109/TMC.2022.3195226.

46. Yang, M. A new computer interface based on in-solid acoustic source localization / M. Yang, D. T. Pham, M. Al-Kutubi, Z. Ji and Z. Wang // 2009 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics. – IEEE, 2009. – P. 131-135. DOI: 10.1109/INDIN.2009.5195791.

47. Pham, D.T. et al. Pattern matching for tangible acoustic interfaces / D.T. Pham, M. Al-Kutubi, M. Yang, Z. Wang, Z. Ji // Intelligent Production Machines and Systems. – Elsevier Science Ltd, 2006. – P. 556-561. DOI: 10.1016/B978-008045157-2/50097-3.

48. Pham, D.T. A novel human-computer interface based on passive acoustic localisation / D.T. Pham, Z. Ji, M. Yang, Z. Wang, M. Al-Kutubi // Human-Computer Interaction. Interaction Platforms and Techniques: 12th International Conference, HCI International 2007, Beijing, China, July 22-27, 2007, Proceedings, Part II 12. – Springer Berlin Heidelberg, 2007. – P. 901-909. DOI: 10.1007/978-3-540-73107-8_99.

49. Самарин, А. Сенсорные панели NORITAKE для жестких условий эксплуатации / А. Самарин // Компоненты и технологии. – 2015. – № 8(169). – С. 11-14.

50. Лопухов, И. Защищенные дисплеи для жестких условий эксплуатации / И. Лопухов // Control Engineering Россия. – 2017. – № 1(67). – С. 26-29.

51. Кирсанов, Э.Я. Разновидности сенсорных поверхностей и продвижения в сфере их изготовления / Э.Я. Кирсанов // Научные революции: сущность и роль в развитии науки и техники: сборник статей Международной научно-практической

конференции, Уфа, 20 января 2018 года. Том Часть 2. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна". – 2018. – С. 54-56.

52. ГОСТ 14254-2015 (IEC 60529:2013). Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP). М.: Стандартиформ, 2016. – 13 с.

53. ГОСТ IEC 62262:2015. Степени защиты, обеспечиваемой оболочками от наружного механического удара (Код IK). М.: Стандартиформ, 2016. – 11 с.

54. Барон, А., Бабушкина, Л. Панельные компьютеры: краткий путеводитель по рынку часть 2 / А. Барон, Л. Бабушкина // Современные технологии автоматизации. – 2017. – № 1. – С. 6-21.

55. Санитарно-эпидемиологические требования к организации общественного питания населения (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 27.10.2020 N 32) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_367564/47eed3976d21a946bdffdс2bd5b9535a2f8930с3/

56. Кузнецов, Г.Н. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море / Г.Н. Кузнецов, В.М. Кузькин, С.А. Переселков // Акустический журнал. – 2017. – № 63(4). – С. 406-418. – DOI: 10.7868/S0320791917040086.

57. Гусев, А.Е. Разработка сенсора на основе микрофонной решётки для локализации источника звука / А.Е. Гусев // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. – 2017. – № 7(4). – С. 35-39.

58. Гусев, А.Е. Пространственная локализация источника звука с использованием микрофонных решёток / А.Е. Гусев, О.Е. Бизин, Д.А. Токарев // Перспективные технологии в средствах передачи информации - ПТСПИ-2017: Материалы 12-ой международной научно-технической конференции, в 2-х томах, Суздаль, 05–07 июля 2017 года. Том 1. – Суздаль: Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – 2017. – С. 204-206.

59. Чифранов, Г.Н. Локализация источника звука на основе распределенных акустических сенсоров / Г.Н. Чифранов // Прикладная электродинамика, фотоника

и живые системы - 2021: VIII Молодежная международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, Казань, 08–10 апреля 2021 года. – Казань: ИП Сагиева А.Р. – 2021. – С. 182-183.

60. Cano, J. filter-based algorithm for simultaneous time synchronization and localization in UWB networks/ J. Cano, S. Chidami, J.L. Ny // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2019. – С. 1431-1437. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8794180

61. Fokin, G. Algorithm for topology search using dilution of precision criterion in ultra-dense network positioning service area/ G. Fokin, A. Koucheryavy //Mathematics. – 2023. – Т. 11. – №. 10. – С. 2227. DOI: 10.3390/math11102227

62. Никитин, Н.И. Локализация источника звука в условиях маскировки / Н.И. Никитин, М.Ю. Агаева // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. – 2020. – № 56(7). – С. 656. – DOI: 10.31857/S0044452920071080.

63. Ткаченко, В.Н. Методы и алгоритмы решения экстремальной задачи определения координат источника звука в условиях избыточности информации / В.Н. Ткаченко, Т.С. Хашан, Р.И. Мануйленко // Системы и средства искусственного интеллекта. – 2013. – №. 1. – С. 207-210.

64. Патент № 2642157 С2 Российская Федерация, МПК G01S 3/808. Способ локализации источника звука и гуманоидный робот, использующий такой способ: № 2016116896: заявл. 29.09.2014: опубл. 24.01.2018 / Г. Рюмп.

65. Бурдин, В.А. Методы локализации источников звука в акустооптических сенсорных сетях / В.А. Бурдин, О.Ю. Губарева // Фундаментальные проблемы оптики - 2020: Сборник трудов XII Международной конференции, Санкт-Петербург, 19–23 октября 2020 года / Под редакцией С.А. Козлова. – Санкт-Петербург: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет ИТМО". – 2020. – С. 199.

66. Кузькин, В.М. Метод определения местоположения малозумного источника звука / В.М. Кузькин, С.А. Переселков, И.В. Казначеев, С.А. Ткаченко //

Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. – 2018. – № 2. – С. 53-63.

67. Щербина, А.О. Локализация источников акустического излучения по данным распределенной системы комбинированных приемников / А.О. Щербина, А.А. Солодчук, В.А. Васькин, В.Е. Торгонский // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: Сборник тезисов докладов XIII международной конференции ИКИР ДВО РАН, с. Паратунка, 25–29 сентября 2023 года. – с. Паратунка: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2023. – С. 84.

68. Qin, M. Compressive sensing-based sound source localization for microphone arrays / M. Qin, D. Hu, Z. Chen, F Yin // Circuits, Systems, and Signal Processing. – 2021. – Т. 40. – Р. 4696-4719. DOI: 10.1007/s00034-021-01692-y

69. Donoho, D.L. Compressed sensing / D.L. Donoho // IEEE Transactions on information theory. – 2006. – Т. 52. – №. 4. – Р. 1289-1306. DOI: 10.1109/TIT.2006.871582

70. Gu, J.C. Sound source localization using piezoelectric acoustic metasurfaces / J. C. Gu, W. Lin, C.X Kan // Acoustics Australia. – 2020. – Т. 48. – Р. 455-461. DOI: 10.1007/s40857-020-00205-2

71. Thakallapalli, S. NMF-weighted SRP for multi-speaker direction of arrival estimation: robustness to spatial aliasing while exploiting sparsity in the atom-time domain / S. Thakallapalli, S.V. Gangashetty, N. Madhu //EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing. – 2021. – Т. 2021. – Р. 1-18. DOI: 10.1186/s13636-021-00201-y.

72. Алиева, Т.И. Безопасность использования сжатых мультимедийных файлов как компонентов цифровой образовательной среды / Т.И. Алиева // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2018. – № 23(6). – С. 59-67. – DOI: 10.18127/j15604128-201806-10.

73. Рудин, А.В. Исследование зависимости скорости распространения продольных ультразвуковых волн в твердом теле от приведенного сечения / А.В.

Рудин, А.Д. Семенова, К.А. Костин // Инжиниринг и технологии. – 2024. – № 9(1). – С. 99-104. – DOI: 10.21685/2587-7704-2024-9-1-20.

74. Сандибаева, Н.А. Разработка лабораторного эксперимента по определению скорости звука в твердых телах для студентов младших курсов / Н.А. Сандибаева, В.В. Пак // Вестник Казахского национального женского педагогического университета. – 2019. – № 4. – С. 80-86.

75. Турдиалиева, М.М. Современные звукоизмерительные приборы / М.М. Турдиалиева // Universum: технические науки. – 2023. – № 10-2(115). – С. 5-7.

76. Султанов, Р.Г. Метод определения места утечки подводного трубопровода с футляром и места негерметичности футляра / Р.Г. Султанов, Ф.М. Мустафин, Ф.М. Мугаллимов Т. А. Ишмуратов, Л. З Каримов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 4(106). – С. 93-101.

77. Мозгонов, М.Ю. Подход к организации триангуляционных измерений по определению дальности на борту истребителя / М.Ю. Мозгонов // Наука и образование сегодня. – 2017. – № 11(22). – С. 29-32.

78. Самойленко, Б.И. Мобильная визуализация данных об электромагнитном излучении беспроводных сетей / Б.И. Самойленко, В.Н. Вичугов, А.А. Вичугова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – № 326(5). – С. 121-130.

79. Шарабанова, А.В. Метод нахождения координат источника сигнала в подводной среде / А.В. Шарабанова // Наука, техника и образование. – 2015. – № 5(11). – С. 59-62.

80. Амиргалиев, Е. Применение беспроводных сетей для определения положения внутри помещения – трилатерация / Е. Амиргалиев, Р. Юнусов // Современные проблемы информатики и вычислительных технологий: Материалы научной конференции ИИВТ МОН РК, 29-30 июня 2017 года. – Алматы. – 2017. – С. 29.

81. Шабанов, Э.В. Дифференциальная гиперболическая трилатерация / Э.В. Шабанов, В.М. Гиниятуллин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – Т. 15, № 2. – С. 63-69.

82. Bensky, A. Wireless Positioning Technologies and Applications, Second Edition. – Artech House. – 2016.

83. Зуев, В.С. Преимущества и недостатки специализированных пакетов в образовательном процессе / В.С. Зуев, Н.А. Гасратова, Н.С. Шишмакова // Бюллетень науки и практики. – 2018. – № 4(5). – С. 31-36. – DOI: 10.5281/zenodo.1246054.

84. Балышева, О.Л. Моделирование распространения поверхностных акустических волн в многоэлементных периодических структурах / О.Л. Балышева, А.С. Койгеров // Радиотехнические, оптические и биотехнические системы. Устройства и методы обработки информации: Вторая Всероссийская научная конференция: сборник докладов, Санкт-Петербург, 14–22 апреля 2021 года / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. – 2021. – С. 115-118. – DOI: 10.31799/978-5-8088-1555-1-2021-2-115-118.

85. Койгеров А.С. Быстрый численный расчет параметров поверхностных акустических волн Рэлея для модели связанных мод / А.С. Койгеров, О.Л. Балышева // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2022. – № 25(5). – С. 67-79. DOI: 10.32603/1993-8985-2022-25-5-67-79

86. Петров, К.В. Моделирование распространения акустических волн в цилиндрических объектах с дефектами в COMSOL Multiphysics / К.В. Петров, А.Ф. Башарова, Г.Л. Пушина, Е.В. Недзвецкая // Приборостроение в XXI веке - 2016. Интеграция науки, образования и производства: Сборник материалов XII Международной научно-технической конференции, Ижевск, 23–25 ноября 2016 года. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашикова. – 2017. – С. 284-291.

87. Львов, А.В. Триангуляционная система определения координат источника звука / А.В. Львов, М.Н. Агапов, А.И. Тищенко // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 158-161.

88. Львов, А.В. Распределенная микроконтроллерная система акустической локации / А.В. Львов, М.Н. Агапов, А.И. Тищенко // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 11. – С. 5.

89. Hao, X. A low-power ultra-light small and medium size acoustic wave touch screen / X. Hao, H. Kui // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Т. 513. – P. 4072-4075. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.513-517.4072.

90. Ghaziasgar, M. A surface acoustic wave touchscreen-type device using two transducers / M. Ghaziasgar, J. Connan // Proc. Southern Africa Telecommunication Networks and Applications Conference (SATNAC 2008) – 2008. – P. 121-126.

91. Yang, Z. Adaptability of ultrasonic Lamb wave touchscreen to the variations in touch force and touch area / Z. Yang, X. Liu, B. Wu, R. Liu // Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 5. – P. 1736. DOI: 10.3390/s21051736.

92. Firouzi, K. Lamb wave multitouch ultrasonic touchscreen / K. Firouzi, A. Nikoozadeh, T. E. Carver, B. P. T. Khuri-Yakub // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2016. – Т. 63. – №. 12. – P. 2174-2186. DOI: 10.1109/TUFFC.2016.2608781.

93. Yang, Y. Power analysis for the design of a large area ultrasonic tactile touch panel / Y. Yang, B. Lemaire-Semail, F. Giraud, M. Amberg, Y. Zhang, C. Giraud-Audine // The European Physical Journal Applied Physics. – 2015. – Т. 72. – №. 1. – P. 11101. DOI: 10.1051/epjap/2015150051

94. Kim, H. UbiTap: Leveraging acoustic dispersion for ubiquitous touch interface on solid surfaces / H. Kim, A. Byanjankar, Y. Liu, Y. Shu, I. Shin // Proceedings of the 16th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. – 2018. – P. 211-223. DOI: 10.1145/3274783.3274848.

95. Козин, А.В. Разработка и исследование математической и программной моделей вычислительной системы сенсорного устройства ввода информации / А.В. Козин, В.И. Фрейман // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2024. – № 2(62). – С. 44-56. – DOI: 10.25686/2306-2819.2024.2.44.

96. 8. Козин А.В. Разработка математических моделей для исследования характеристик вычислительной системы сенсорного устройства ввода информации, построенного на основе акустических измерителей / А.В. Козин, В.И. Фрейман // Современное программирование: материалы VI Международной научно-практической конференции, Нижневартовск, 09-11 декабря 2024 года. – Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет. – 2025. – С. 72-80.

97. Чабан, Е.А. Создание математических моделей в программе Scilab / Е.А. Чабан // Информационно-коммуникационные технологии в педагогическом образовании. – 2016. – № 4 (42). – С. 38-41.

98. Kudryashova, A.Y. Study of Effectiveness of Scilab Software Means for Solving Optimization Problems / A.Y. Kudryashova, T.I. Semyonova, V.V. Frisk V.N. Shakin // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – IEEE, 2020. – P. 1-5. DOI: 10.1109/WECONF48837.2020.9131166.

99. Козин, А.В. Метод разработки вычислительной системы сенсорного устройства ввода информации на основе акустических измерительных преобразователей / А.В. Козин, В.И. Фрейман // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 52. – С. 117-138.

100. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды (с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5). – М.: Стандартинформ, 2010. – 85 с.

101. Санитарные правила по устройству и оборудованию кабин машинистов кранов" (утв. Главным государственным санитарным врачом СССР 08.12.1974 N 1204-74) (ред. от 16.11.1976) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_102489/

102. ГОСТ 30630.2.1-2013. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию. – М.: Стандартинформ, 2013. – 32 с.

103. ГОСТ 6032-2017 Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость против межкристаллитной коррозии. – М.: Стандартинформ, 2017. – 36 с.

104. ГОСТ 30630.1.2-99 Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие вибрации. – М.: Издательство стандартов, 2000. – 35 с.

105. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024616251 Российская Федерация. Модель вычислительной системы сенсорного устройства ввода информации: № 2024615370: заявл. 19.03.2024: опубл. 19.03.2024 / А. В. Козин, В. И. Фрейман; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

106. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611713 Российская Федерация. Вычислительная система, определяющая место касания по звуковой волне на герметичной приборной панели: № 2023685917: заявл. 29.11.2023: опубл. 24.01.2024 / А. В. Козин, А. В. Якубчик.

107. Мерзликин, С. Сверхбыстродействующие АЦП: особенности архитектуры / С. Мерзликин // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2008. – № 1(83). – С. 30-33.

108. Райс, В. Как работают аналогово-цифровые преобразователи и что можно узнать из спецификации на АЦП / В. Райс // Компоненты и технологии. – 2005. – № 3(47). – С. 116-121.

109. Блажкова, Е.Н. Цифровое устройство управления катушками Гельмгольца / Е.Н. Блажкова, Е.С. Гороховатенко // Вестник молодёжной науки России. – 2021. – № 1. – С. 2.

110. Мокринский, А.А. Микроконтроллеры AVR и STM32 / А.А. Мокринский, А.К. Бойцов // Информационные системы и технологии: теория и практика: Сборник научных трудов / Отв. редактор М.Р. Вагизов. Том Выпуск 15. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова. – 2023. – С. 120-125.

111. Новиков, А.К. Обзор микроконтроллеров общего назначения / А.К. Новиков, Н.В. Горячев, И.И. Кочегаров В.А. Трусков, Т.Ю. Бростилова // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2018. – Т. 2. – С. 319-324.

112. Масюк, В.М. Обзор и классификация современных микроконтроллеров в области мехатроники и робототехники / В.М. Масюк, В.И. Кодубенко, Л.С. Симонова // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы всероссийской научно-технической конференции, Калуга, 15–17 ноября 2016 года. Том 5. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2016. – С. 40-44.

113. Закиряев, К.Э. Выбор микроконтроллера для цифрового регулятора [Электронный ресурс] / К.Э. Закиряев // Постулат. – 2021. – № 12(74). Режим доступа: <https://e-postulat.ru/index.php/Postulat/article/download/3916/3969>

114. Долгов, А.Н. Анализ применимости фильтров низких частот в микроэлектромеханических системах / А.Н. Долгов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2012. – № 4(97). – С. 353-357.

115. Денисенко, Д.Ю. Фильтр низких частот подкласса Sallen-Key с независимой подстройкой основных параметров / Д.Ю. Денисенко, Н.Н. Прокопенко, Ю.И. Иванов, А.В. Бугакова // Современные проблемы радиоэлектроники: Материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 127-й годовщине Дня радио, Красноярск, 11–14 мая 2022 года / Отв. редактор Ф.В. Зандер. – Красноярск: Сибирский федеральный университет. – 2022. – С. 364-369.

116. Усачев, Д.А. Особенности развития радиоэлектроники в России / Д.А. Усачев // Аллея науки. – 2022. – Т. 2, № 6(69). – С. 3-9.

Приложение А

Копии актов внедрения результатов диссертационной работы

041

Акционерное общество «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»

**пнппк**

**Публичное акционерное общество
«Пермская научно-производственная
приборостроительная компания»
(ПАО «ПНППК»)**


1999
2009
2020

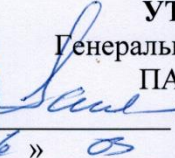

ГОСТ Р ИСО 9001
ГОСТ РВ 0015-002
ГОСТ Р 58876


ISO 9001
ISO 14001
ISO 45001

Россия, 614002, г. Пермь, ул. 25 Октября, 106
тел.: +7 (342) 206 99 99, факс: +7 (342) 280 97 19, e-mail: info@pnppk.ru
ИНН 5904000395, КПП 590401001

№ 37/66-53 от 04.03.2025 г.



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ПАО «ПНППК»

А.Г. Андреев
_____ 2025 г.

АКТ

внедрения (использования) результатов диссертационной работы
Козина Алексея Владимировича.

Комиссия в составе:

председатель:	Заместитель генерального директора по науке – директор НТЦ – главный конструктор	А.В. Субботин
члены комиссии:	Начальник ОССС НТЦ	Р.В. Вихорев
	Зам. начальника отдела - гл. конструктор по серийному сопровождению изделий морской техники	А.В. Соколов

составили настоящий акт о том, что разработанные в диссертации А.В. Козина
«Вычислительная система сенсорных устройств ввода информации на основе
акустических измерительных преобразователей» способ идентификации и модели
определения места касания вычислительной системой, а также метод разработки
вычислительных систем сенсорных устройств ввода информации, приняты к
использованию в ПАО «ПНППК» при производстве пультов управления изделиями
и непосредственно в состав изделий.

По основным показателям внедрения при испытаниях на опытных образцах отмечено, что изменение принципа функционирования устройств ввода в пультах управления с механического на акустический позволило:

- увеличить наработку на отказ пультов управлений в среднем на 11 %;
- уменьшить время отклика при взаимодействии с пультами управления на 32%;
- увеличить гарантийные сроки изделий в среднем на 12 %.

Полученные научные и практические результаты позволяют сделать вывод о том, что эффект от внедрения можно считать положительными. Документации и опытный образец готовятся к передаче на предприятия-партнеры.

Председатель:

Члены комиссии:



А.В. Субботин

Р. В. Вихорев

А. В. Соколов



УТВЕРЖДАЮ

Проректор
по образовательной деятельности
Пермского национального
исследовательского
политехнического университета
доктор педагогических наук, доцент



/ И.Ю. Черникова /

27» марта 2025г.

АКТ

о внедрении результатов,
полученных Козиным Алексеем Владимировичем
при выполнении диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
«ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ ВВОДА
ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ»

Комиссия в составе:

председатель комиссии: д.т.н., профессор Южаков А.А.,

члены комиссии:

д.т.н., профессор Тюрин С.Ф.,

к.т.н., доцент Гончаровский О.В.,

составила настоящий акт о том, что основные теоретические положения и практические результаты диссертационной работы Козина А.В. использованы в образовательном процессе для направлений подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника», 27.03.04 «Управление в технических системах». Предложенные способ идентификации и модели определения места касания вычислительной системой, а также метод разработки вычислительных систем сенсорных устройств ввода информации, нашли применение в содержании дисциплин «Программирование и основы

алгоритмизации», «Численные методы», «Встроенные микропроцессорные системы» и «Цифровая обработка сигналов». Результаты диссертационного исследования применены в рамках практических занятий в виде методик расчетов систем нелинейных уравнений и реализации алгоритмов на языках С, С++, обработки сигналов, в частности, нахождения их первого экстремума, и прикладного программного обеспечения встроенных микропроцессорных систем.

Эффект от внедрения результатов диссертационной работы заключается в повышении уровня освоения профессиональных компетенций и их компонентов (знаний, умений, владений) в области анализа и оценки аналитических и численных моделей вычислительных систем и их элементов, что соответствует требованиям Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования.

Результаты внедрения результатов диссертационной работы обсуждались на заседании кафедры «Автоматика и телемеханика» 24.03.2025, протокол № 11.

Председатель комиссии:

 / Южаков А.А. /

Члены комиссии:

 / Тюрин С.Ф. /

 / Гончаровский О.В. /

«24» 03 2025 г.

Приложение Б
Свидетельства на регистрацию программы ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024611713

**Вычислительная система, определяющая место касания
по звуковой волне на герметичной приборной панели**

Правообладатели: **Козин Алексей Владимирович (RU), Якубчик
Анна Владимировна (RU)**

Авторы: **Козин Алексей Владимирович (RU), Якубчик Анна
Владимировна (RU)**



Заявка № **2023685917**

Дата поступления **29 ноября 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **24 января 2024 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe3853164baf96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024616251

**Модель вычислительной системы сенсорного
устройства ввода информации**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет» (ПНИПУ) (RU)*

Авторы: *Козин Алексей Владимирович (RU), Фрейман
Владимир Исаакович (RU)*



Заявка № 2024615370

Дата поступления 19 марта 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 19 марта 2024 г.

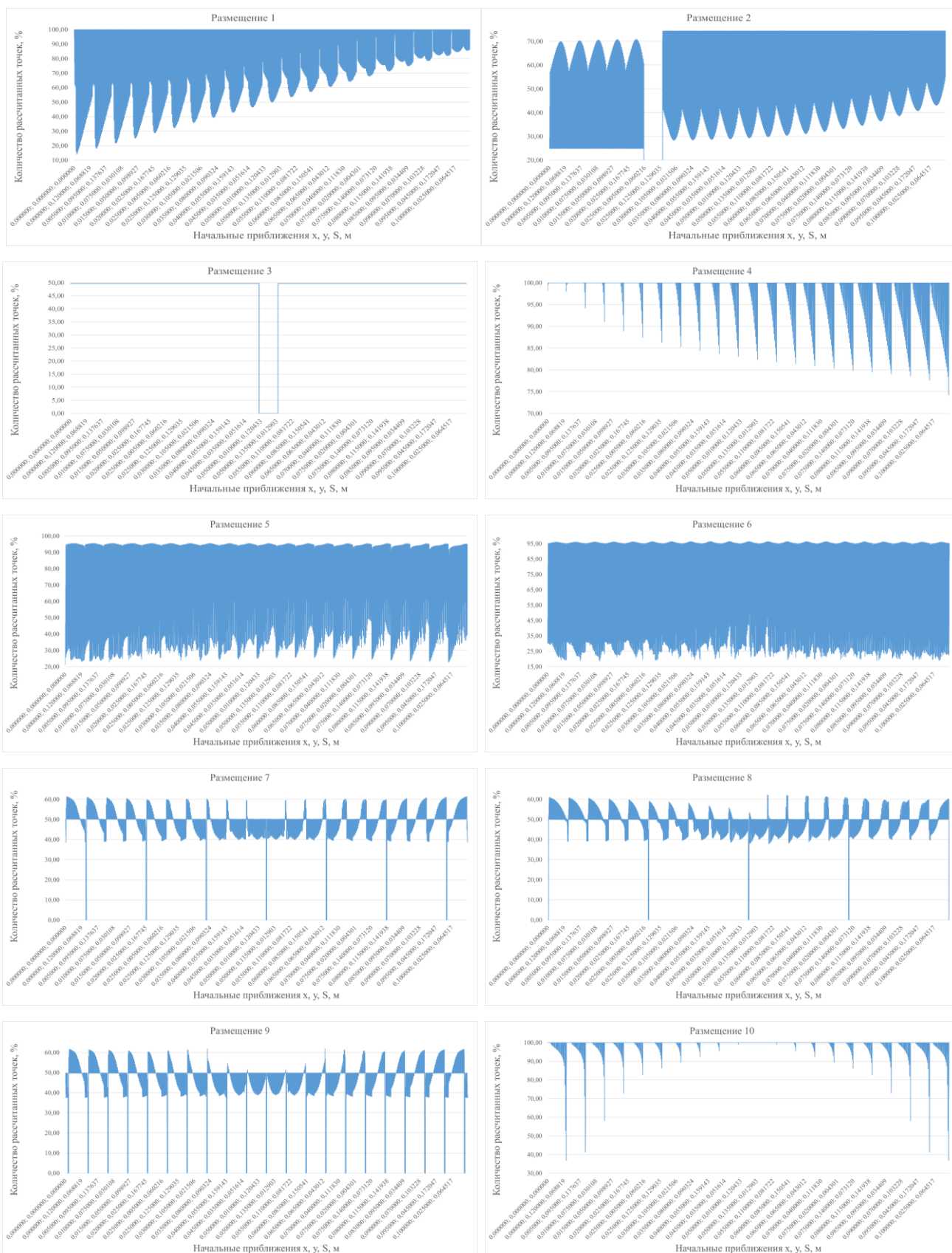
Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

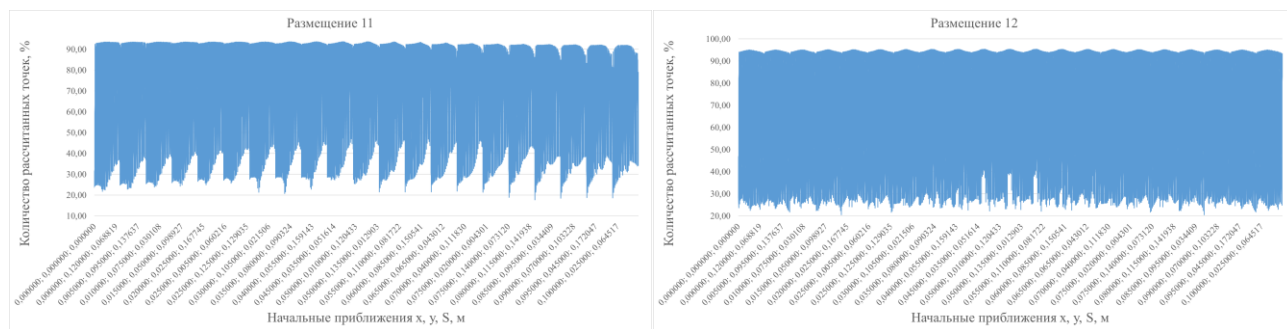
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 429b6a0fe3853164ba96f83b73b4aa7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

Приложение В

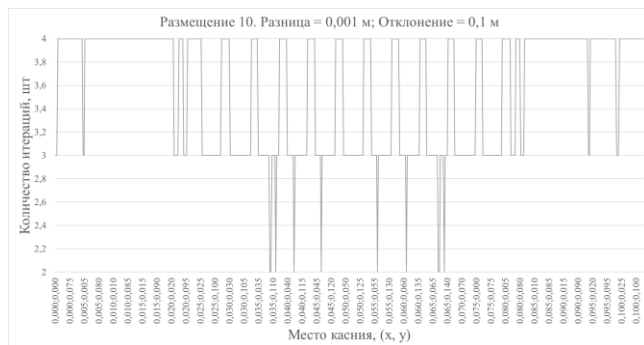
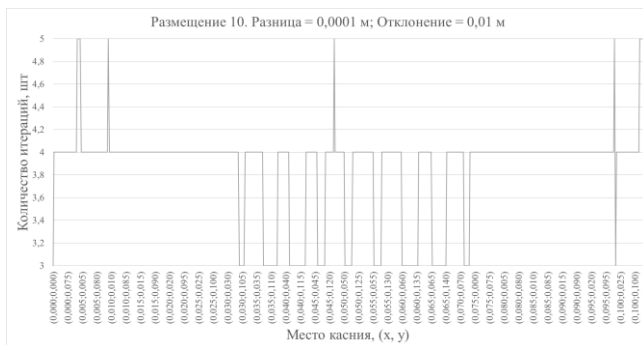
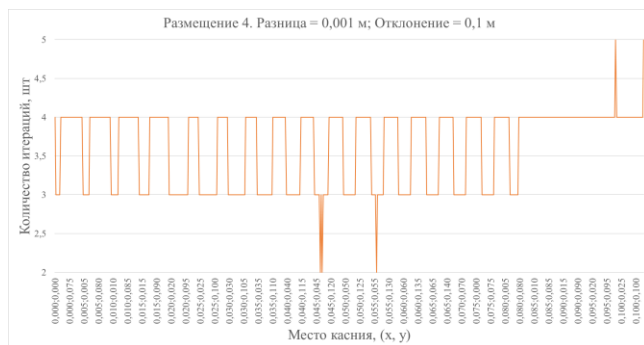
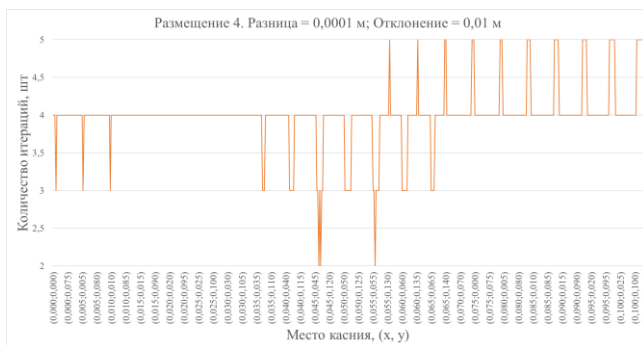
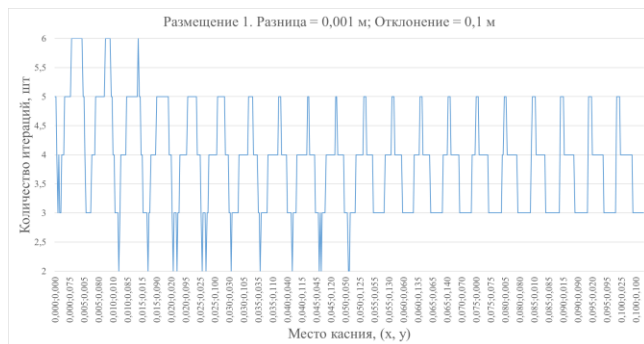
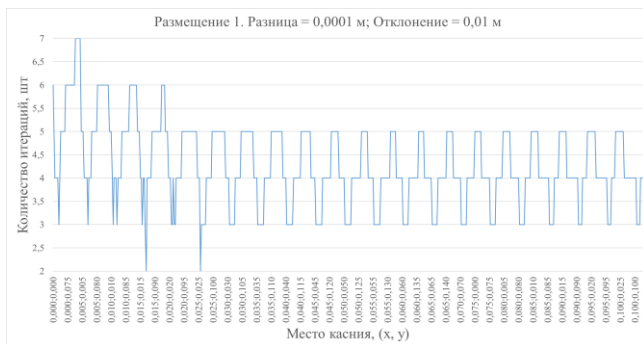
Оценка начальных приближений при разных размещениях регистрирующих устройств





Приложение Г

Оценка количества итераций для разных размещений регистрирующих устройств в зависимости от задаваемой точности



Приложение Д

Оценка точности локализации места касания при разных габаритах устройства



Приложение Е

Листинг кода по поиску экстремума

```
void checkAndUpdateExtremum(int k, int &i, int flag[], float U[][SENS], float Max[], float Min[], int t[], float dU) {
    if (flag[k] == 1 && abs(U[i][k]) > abs(Max[k])) {
        Max[k] = U[i][k];
        t[k] = i;
    }

    if (flag[k] == 2 && abs(U[i][k]) < abs(Max[k])) {
        Max[k] = U[i][k];
        t[k] = i;
    }
}

bool isTransition(int k, int flag[], float U[][SENS], int i[], float Min[], float Max[]) {
    return (flag[k] == 1 && U[i[k]][k] < Min[k]) || (flag[k] == 2 && U[i[k]][k] > Min[k]);
}

void updateFlagAndMinMax(int k, int &i, int flag[], float U[][SENS], float Min[], float Max[], int t[]) {
    if (abs(U[i][k] - U[i - 1][k]) > dU && flag[k] == 0) {
        flag[k] = (U[i][k] > U[i - 1][k]) ? 1 : 2;
        Max[k] = U[i][k];
        t[k] = i;
        Min[k] = U[i - 1][k];
    }
}

//Определение основной функции поиска экстремума
void findExtremum(int &t1, int &t2, int &t3) {
    int i[SENS] = {1, 1, 1};
    int flag[SENS] = {0, 0, 0};
    float Max[SENS] = {U[0][0], U[0][1], U[0][2]};
    float Min[SENS] = {U[0][0], U[0][1], U[0][2]};
    int t[SENS] = {0, 0, 0};

    for (int k = 0; k < SENS; k++) {
        while (true) {
            if (isTransition(k, flag, U, i, Min, Max)) {
                break;
            }

            checkAndUpdateExtremum(k, i[k], flag, U, Max, Min, t, dU);

            if (flag[k] == 1 && abs(U[i[k]][k]) < abs(Max[k]) && abs(U[i[k]][k] - Max[k]) > dU) {
                break;
            }
        }
    }
}
```

```

Max[k]) > dU) {
    if (flag[k] == 2 && abs(U[i[k]][k]) > abs(Max[k]) && abs(U[i[k]][k] -
        break;
    }

    updateFlagAndMinMax(k, i[k], flag, U, Min, Max, t);

    i[k]++;

    if (i[k] > ARRAY_SIZE + 1 && flag[k] == 0 || i[k] > ARRAY_SIZE) {
        break;
    }
}

t1 = t[0];
t2 = t[1];
t3 = t[2];
}

```