



Козин Алексей Владимирович

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

2.3.2. Вычислительные системы и их элементы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь, 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: **ФРЕЙМАН Владимир Исаакович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **БОБЫРЬ Максим Владимирович**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», кафедра «Программная инженерия», профессор

ЯРОСЛАВКИНА Екатерина Евгеньевна
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», кафедра «Информационно-измерительная техника», заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита диссертации состоится «27» июня 2025 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.14 по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Комсомольский проспект, д. 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат диссертации разослан «29» апреля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.14
доктор технических наук, доцент

 **Фрейман**
Владимир Исаакович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 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 улучшить 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» 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, индексируемом в международной базе цитирования Scopus, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описывается актуальность темы диссертации, сформулированы объект и предмет исследования, цель работы, основные задачи, перечислены методы исследования, описана теоретическая и практическая значимость работы, раскрыта научная новизна и сведения о полученных результатах, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ принципов функционирования, технологий изготовления и эксплуатационных характеристик сенсорных устройств ввода информации. Рассмотрены особенности реализации вычислительных систем акустических сенсорных устройств ввода информации. Проанализированы требования к функционированию акустических сенсорных устройств и их вычислительных систем в сложных и специфических условиях эксплуатации. Выполнена математическая постановка задачи исследования.

Проанализированы три физических принципа действия (матрицы, излучения, акустические сигналы) сенсорных устройств ввода информации (таблица 1), для каждого выделены достоинства и недостатки. Для разрабатываемого устройства ввода информации выбран третий принцип, основывающийся на регистрации распространяющихся по сенсорной поверхности акустических волн, что позволяет обеспечить выполнение всех перечисленных требований.

Вычислительные системы акустических устройств ввода можно разделить на две группы: те, которые используют излучатели и приемники, и те, которые используют только приемники. Достоинством системы, использующей излучатели и приемники, является вандалоустойчивость, однако из-за высокой чувствительности и работы, основанной на регистрации локальных отражений звуковой волны, может происходить ложное срабатывание, которое приводит к ошибкам функционирования.

Таблица 1 – Анализ 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, °С	-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

Вычислительные системы, использующие только приемники, в свою очередь делятся на два типа: те, которые обрабатывают колебания, созданные при касании, и рассчитывают по ним место, где оно произошло, и те, которые сравнивают зарегистрированные колебания с записанными в памяти. Достоинством первых является высокоточная локализация места касания, однако существенным недостатком таких систем является вычислительная сложность алгоритмов. Достоинством вторых систем является простота реализации алгоритмов, а недостатком – для их работы необходимо большое количество памяти. Кроме того, для сравнения полученного сигнала со всеми имеющимися записями требуется продолжительное время, что снижает быстродействие таких систем.

Разрабатываемая вычислительная система использует только приемники и относится к первому типу таких систем, но позволяет нивелировать ее недостатки.

Математическая постановка задачи. Введем показатели вычислительных систем сенсорных устройств ввода: 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 определим:

$$R = f(N, S, G, B), R > R_T, \quad (1)$$

$$Q = f(N, S, M, G, B), Q > Q_T, \quad (2)$$

$$P = f(S, M, G, B), P > P_T. \quad (3)$$

Сформулируем постановку 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.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию способа локализации места касания вычислительной системой с помощью звуковых волн, распространяющихся по основе сенсорного устройства ввода информации.

При взаимодействии пользователя с основой сенсорного устройства происходит касание, создающее волну или, иными словами, колебания (звуковую волну как физическое явление). Эта волна распространяется со скоростью V , которая зависит от свойств материала.

Для фиксации волны используются устройства регистрации, основанные на пьезоэлектрических кристаллах. На применяемых в работе регистрирующих устройствах фиксируется нестационарный синусоподобный колебательный сигнал. В этом сигнале момент времени первого экстремума, необходимый для расчета, определяется на первой полуволне колебания, вызванного касанием. Все последующие экстремумы возникают из-за интерференции отраженных волн и не учитываются в расчетах.

Способ локализации места касания заключается в том, что его можно определить, используя: расчетное время регистрации первого экстремума t_i (для $i = 1, 2, 3$) заданное расположение как минимум трех регистрирующих устройств; известное значение скорости распространения колебаний V . Имея эти данные, определим расстояние S_i от места касания до приемника следующим образом:

$$S_i = V(t_i - t_0), \quad (4)$$

где t_0 – неизвестное время начала касания, которое необходимо вычислить.

Отличием предлагаемого способа от известных является наличие только трех неспециализированных приемников, анализ только первого экстремума, отсутствие необходимости записи шаблонов и анализа полной формы сигналов.

Использование трех микрофонов объясняется тем, что при меньшем их количестве локализовать источник звука не представляется возможным. При наличии одного регистрирующего устройства возникает бесконечное количество ложных точек касания, находящихся на расстоянии S_1 (рисунок 1,а). При использовании двух регистрирующих устройств количество ложных точек касания сокращается до одной, так как количество комбинаций расстояний S_i уменьшается до двух (рисунок 1,б). При наличии трех регистрирующих устройств все расстояния S_i становятся уникальными (рисунок 1,в).

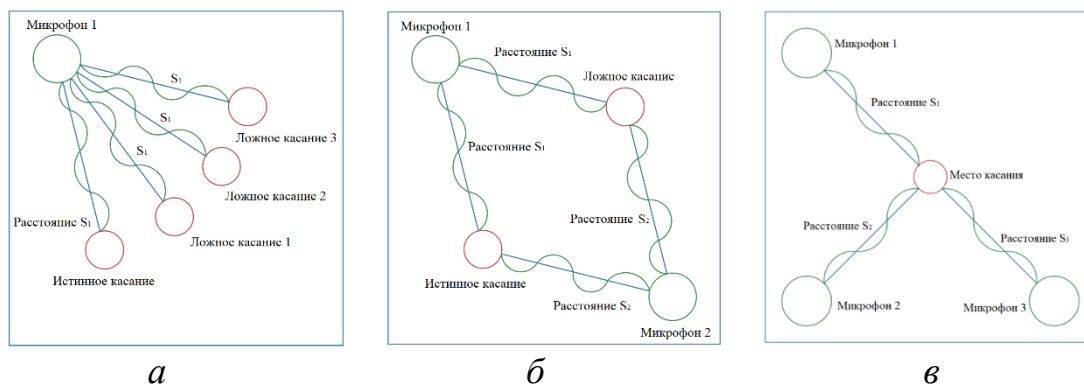


Рисунок 1 – Локализация акустического сигнала регистрирующими устройствами:
а – одним; *б* – двумя; *в* – тремя

Метод триангуляции не применим из-за отсутствия постоянного или повторяющегося сигнала излучения и сканирующих приемников. Метод трилатерации не применим по причине отсутствия передачи метки времени t_0 .

Для верификации предложенного способа было проведено моделирование распространения колебательных волн по основе сенсорной панели с фиксацией в различных точках в программной среде Comsol.

В компьютерной модели панель устройства представлена конструкцией из стали с габаритными размерами 200 мм × 200 мм × 4 мм (длина, ширина, высота), установленной на четырех опорах, как показано на рисунке 2. К внутренней части прикреплены три регистрирующих устройства с координатами: M_1 (40; 20; 0), M_2 (160; 20; 0), M_3 (40; 180; 0), а место касания D (150; 100; 4) и распределение колебательных волн показано для примера в точке 4.

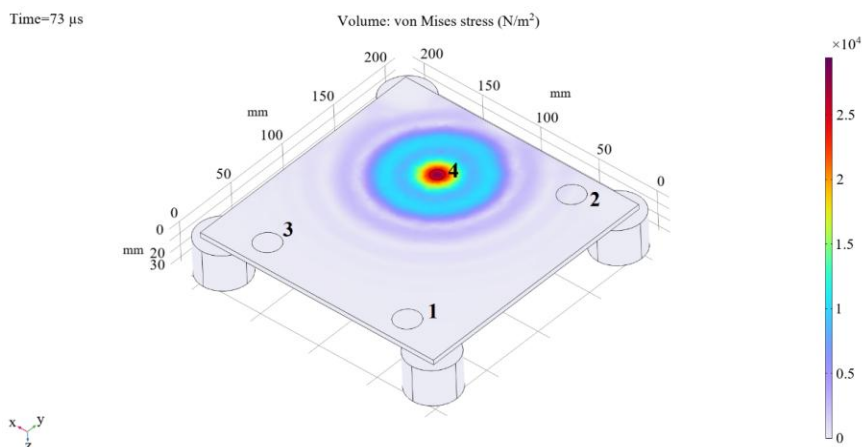


Рисунок 2 – Построенная модель сенсорной основы устройства ввода

При моделировании использовалась безэховая среда и одиночное касание. Полученные колебательные сигналы, зарегистрированные разными устройствами, показаны на рисунке 3. Как видно из рисунка 3, *а*, зарегистрированная волна имеет сложную форму. Однако, согласно предложенному способу, из этого сигнала выделяется первый экстремум, как показано на рисунке 3, *б*. Приведем пример полученных временных меток относительно начала моделирования (место касания равноудалено от M_1 и M_2): момент касания $t_0 = 6$ мкс, моменты первых экстремумов $t_1 = 50,2$ мкс, $t_2 = 45,2$ мкс, $t_3 = 33,5$ мкс. Применяв формулу (4) и используя скорость звука $V = 3248,50$ м/с, получим расстояния от места касания до регистрирующих

устройств: $S_1 = 143,58$ мм, $S_2 = 127,34$ мм, $S_3 = 89,33$ мм. Используя критерий χ^2 , в работе проведена оценка соответствия полученных результатов моделирования расчетным значениям. Согласно проведенному анализу, результаты находятся на уровне значимости 95%.

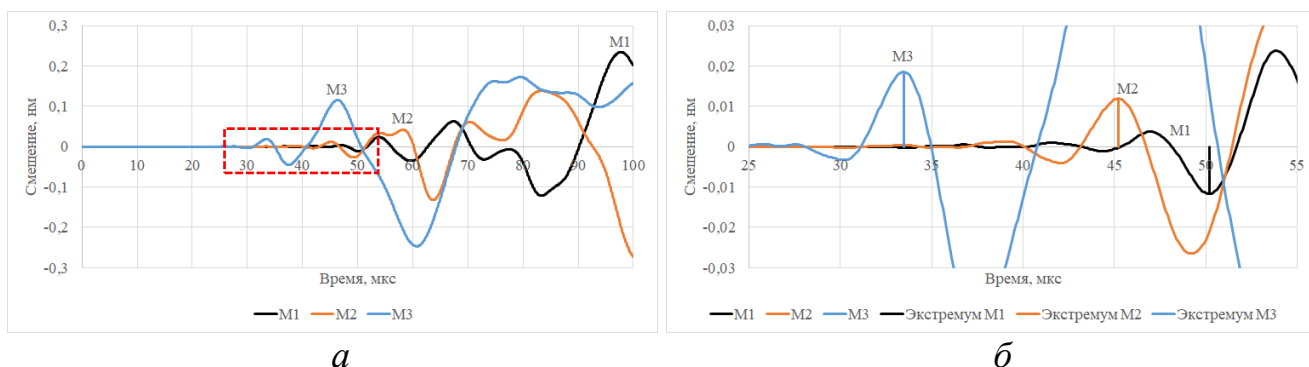


Рисунок 3 – Результаты моделирования Comsol: *а* – сигналы (с выделением области первых экстремумов); *б* – область первых экстремумов

Для оценки адекватности построенной компьютерной модели и предложенного способа было проведено экспериментальное исследование на макете устройства. Параметры макета полностью соответствовали параметрам модели, за исключением того, что регистрирующие устройства были приклеены с помощью специального воска, а среда не является безэховой.

На рисунке 4 представлены зарегистрированные сигналы с трех устройств в точке касания *D*. Приведем пример временных меток (место касания равноудалено от *M1* и *M2*) относительно начала измерения (с учетом предшествующих показаний): момент касания $t_0 = 199$ мкс, моменты первых экстремумов $t_1 = 267,6$ мкс, $t_2 = 240,68$ мкс, $t_3 = 266,26$ мкс. Используя уравнение (4) и используя скорость звука в материале физического образца $V = 2000$ м/с, получены следующие значения расстояний: $S_1 = 136,89$ мм, $S_2 = 83,05$ мм, $S_3 = 134,21$ мм.

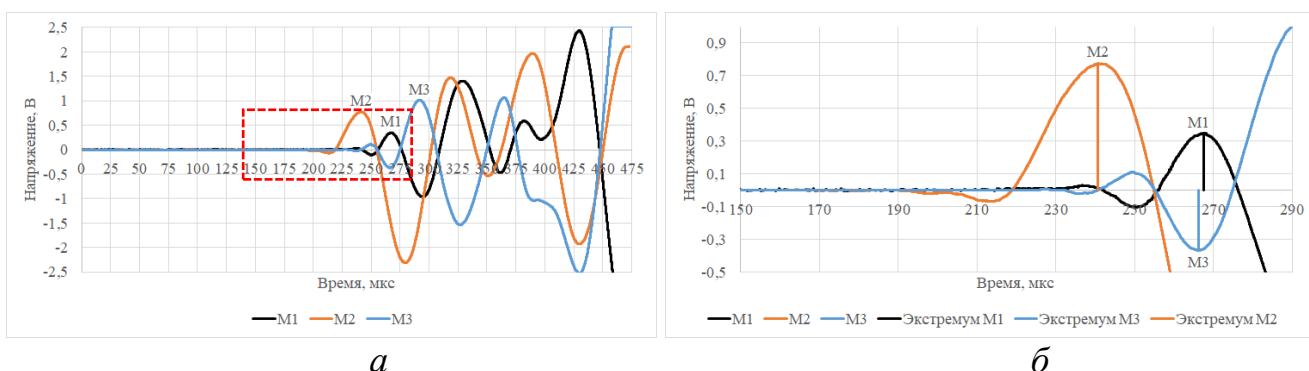


Рисунок 4 – Результаты измерения на макете: *а* – сигналы (с выделением области первых экстремумов); *б* – область первых экстремумов

Для оценки степени совпадения результатов математического моделирования и экспериментов использован критерий χ^2 , согласно которому результаты находятся в зоне 95% значимости. Небольшие различия между компьютерной и физической моделью можно объяснить следующим образом: материал крепления регистрирующих устройств имеет свой коэффициент передачи колебаний, связанный с его физически-

ми характеристиками; в реальных условиях добиться идеальной ровности и равномерного распределения свойств материала, как в модели, практически невозможно.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет определить место касания по следующим исходным данным: места размещения регистрирующих устройств, время фиксации первого экстремума звуковой волны и скорость ее распространения.

В **третьей главе** представлены разработанные математические и программные модели позиционирования точки касания вычислительной системой акустического устройства ввода информации. Отличием такого подхода от известных является отсутствие возможности определения направления на источник сигнала и использования временной синхронизации.

Аналитическая модель локализации точки касания. Используя имеющийся набор входных данных (время фиксации звуковой волны регистрирующим устройством t_i , скорость звука в материале V , расположение регистрирующих устройств $(x_i; y_i; z_i)$), можно составить уравнение прямой в объеме для одного регистрирующего устройства, применив приведенное ранее представление о неизвестном пути:

$$[V(t_i - t_0)]^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2. \quad (5)$$

Так как в уравнении имеется 3 неизвестные: x , y и t_0 , а в предложенном способе используется всего три регистрирующих устройства, можно составить следующую систему уравнений для нахождения неизвестных:

$$\begin{cases} [V(t_1 - t_0)]^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 \\ [V(t_2 - t_0)]^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 \\ [V(t_3 - t_0)]^2 = (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 \end{cases} \quad (6)$$

Раскрыв скобки и произведя последовательное попарное вычитание уравнений, получим следующую систему линейных уравнений, где все неизвестные и их коэффициенты находятся в правой части, а все известные значения – в левой части:

$$\begin{cases} K_{11}x + K_{12}y + K_{13}t_0 = k_1 \\ K_{21}x + K_{22}y + K_{23}t_0 = k_2 \\ K_{31}x + K_{32}y + K_{33}t_0 = k_3 \end{cases} \quad (7)$$

Примечание. Значения коэффициентов приведены в диссертации.

Используя полученные ранее при моделировании значения координат микрофонов и времени регистрации колебаний, проведено исследование системы уравнений на совместность. При исследовании выявлено, что ранг матрицы и расширенной матрицы этой системы равен двум, а это меньше числа неизвестных и, согласно теореме Кронекера–Капелли, такая система имеет бесконечное множество решений.

Численная модель локализации точки касания. Представим систему уравнений (6) по порядку регистрации приемниками звуковой волны:

$$\begin{cases} [V(t_1 - t_0)]^2 = S^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 \\ [V(t_1 - t_0) + V(t_2 - t_1)]^2 = (S + S_2)^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2, \\ [V(t_1 - t_0) + V(t_3 - t_1)]^2 = (S + S_3)^2 = (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 \end{cases} \quad (8)$$

где t_1 – время регистрации первым (ближним) приемником; t_2 – время регистрации вторым приемником; t_3 – время регистрации первым (дальним) приемником; S – путь от точки ка-

сания до ближайшего регистрирующего устройства; S_i – путь, пройденный с момента регистрации 1-м устройством до момента регистрации i -м устройством, где $i = 2, 3$.

Для решения этой системы в работе предлагается применить метод Ньютона. Для этого выразим каждое уравнение через функцию F_i . Для получения значений каждой из функций F_i необходимо задать начальное приближение каждой неизвестной переменной S , x и y , например:

$$\begin{cases} x_{\text{нп}} = \frac{W}{2} \\ y_{\text{нп}} = \frac{L}{2}, D = \sqrt{W^2 + L^2 + H^2}, \\ S_{\text{нп}} = \frac{D}{2} \end{cases} \quad (9)$$

где D – пространственная диагональ; H – высота; W – ширина; L – длина сенсорной панели. С помощью имеющихся 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 $\det J$. Используя полученные значения F_i и $\det J$, можно найти корректирующее значение начального приближения неизвестных ΔS , Δx и Δy . Поле выполнения всех расчетов полученные значения сравниваются с системой ограничений:

$$\{|\Delta x| \leq \varepsilon; |\Delta y| \leq \varepsilon; |\Delta S| \leq \varepsilon; x \geq 0; y \geq 0; S \geq 0\}, \quad (10)$$

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.

В работе проведен анализ работоспособности предложенной численной модели для расчета неизвестной точки касания. В качестве исходных данных для расчета места касания выбирались различные расположения регистрирующих устройств N (рисунок 5), а также различные координаты точки касания.

Размещение	Графическое представление	Размещение	Графическое представление	Размещение	Графическое представление	Размещение	Графическое представление
1		7		4		10	
2		8		5		11	
3		9		6		12	

Рисунок 5 – Варианты размещений регистрирующих устройств на подложке

Параметры модели для оценки: высота сенсорной панели $L = 0,14$ м, ширина $W = 0,1$ м, высота $H = 0,004$ м, скорость распространения звуковой волны в алюми-

нии $V = 6360$ м/с, погрешность E (разница между рассчитанной точкой касания и заданной) должна быть не более 10^{-4} м, допустимое отклонение между расчетами итераций $\varepsilon = 10^{-6}$ м.

По результатам анализа сформулированы следующие зависимости точности локализации R и количества затрачиваемых итераций для расчета точки касания Q от различных размещений N , начального приближения (НП), допустимого отклонения между расчетами итераций ε , разность между расчетными и заданными координатами точки касания E .

Построим ряд зависимостей для решения частных задач исследования.

1. Задача – определить НП и N для $R \rightarrow 100\%$. Построим зависимость R от НП при заданных N (рисунок 6,а):

$$R = f(\text{НП}) \mid N = \text{const} \quad (11)$$

Вывод: оптимальными размещениями микрофонов с максимальным показателем R являются 1, 4 и 10 (рисунок 5) с начальным приближением (9).

2. Задача – определить W и H для $R \rightarrow 100\%$. Построим зависимость R от W и H при заданных N , E и ε (рисунок 6,б):

$$R = f(W, H) \mid N = \text{const}, E = \text{const}, \varepsilon = \text{const} \quad (12)$$

Вывод: изменение габаритов влияет на размещения 1 и 10, при этом не оказывает влияние на размещение 4.

3. Задача – определить ε и E для $R \rightarrow 100\%$. Построим зависимость R от ε при заданных N и E (рисунок 6,в,г):

$$R = f(\varepsilon) \mid N = \text{const}, E = \text{const} \quad (13)$$

Вывод: оптимальные варианты – $E = 10^{-4}$ м, $\varepsilon_{\min} = 10^{-2}$ м при размещении 1, $\varepsilon_{\min} = 10^{-1}$ м при размещениях 4 и 10; $E = 10^{-3}$ м, $\varepsilon_{\min} = 10^{-1}$ м при размещениях 1, 4 и 10.

4. Задача – определить E и ε для $Q \rightarrow 1$. Построим зависимость Q от E и ε при заданных N (рисунок 6,д):

$$Q = f(E, \varepsilon) \mid N = \text{const} \quad (14)$$

Вывод: с понижением допустимого ε и E снижается количество итераций, требуемых для расчета точки касания, при этом точность локализации не меняется.

Предложенная численная модель может быть реконфигурирована под различные входные параметры. Полученные зависимости могут быть использованы для достижения 100% локализации точки касания с минимальным количеством итераций при расчете этой точки.

Зная влияние всех параметров на работоспособность модели, в работе проведена оценка с использованием других методов решения систем нелинейных уравнений. Для сравнения применялись метод простых итераций и метод Зейделя. Результаты работы этих методов представлены на рисунке 7,а, используемые НП показаны в таблице 2.

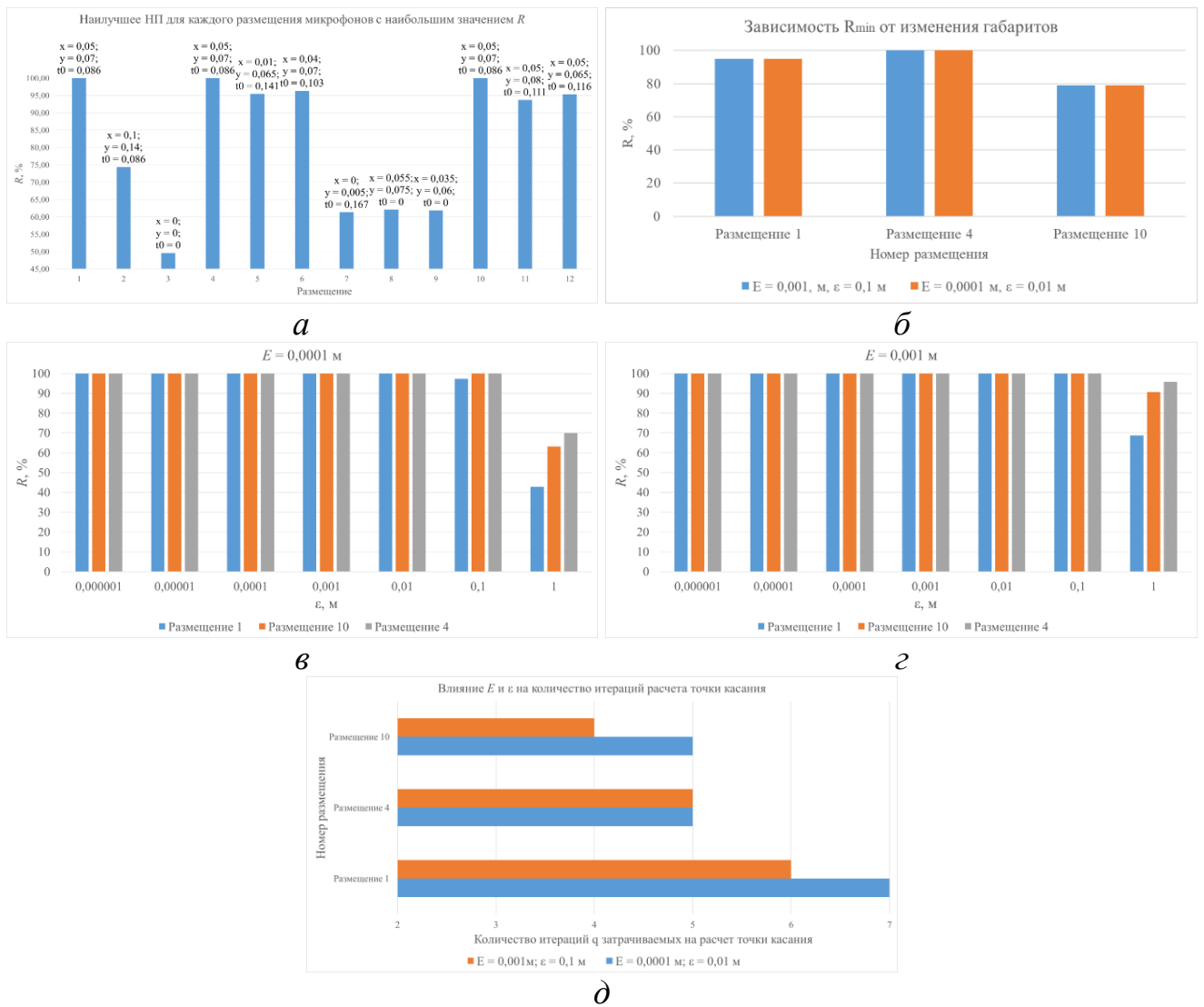


Рисунок 6 – Зависимость R от: a – НП при заданных N ; $б$ – W и H при заданных N ; E и ϵ , $в$ – ϵ при заданных N и $E = 0,0001$ м; $г$ – ϵ при заданных N и $E = 0,001$ м; $д$ – зависимость Q от E и ϵ при заданных N

Таблица 2 – Задаваемые начальные приближения

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	$x = W, y = L, S = D/2$		

Использование других подходов для локализации точки касания демонстрирует значительно худшие результаты по сравнению с предлагаемым. В связи с этим проведено сравнение предложенной модели со встроенными численными методами в программной среде SciLab. Результаты представлены на рисунке 7,б.

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.

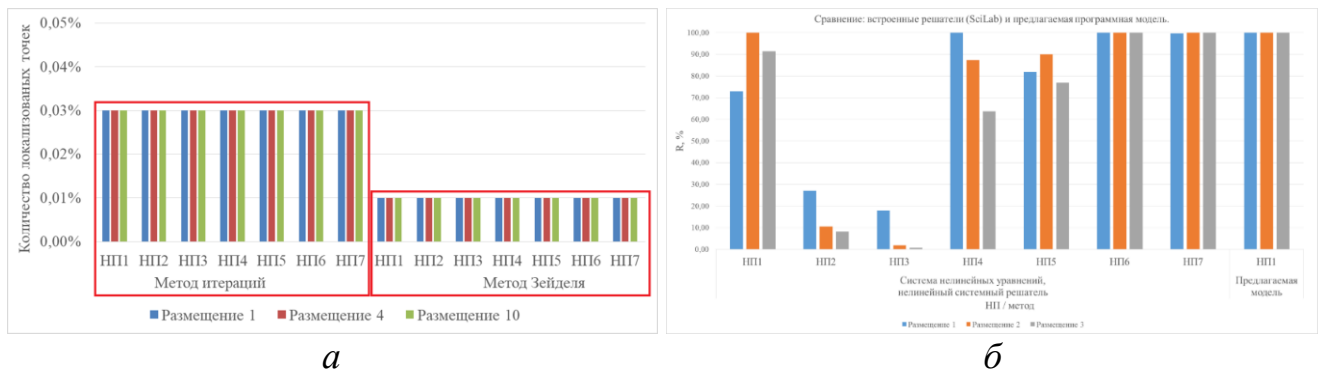


Рисунок 7 – Сравнение: *а* – с методами решения систем нелинейных уравнений; *б* – со встроенными решателями (SciLab)

Оценка вычислительной сложности алгоритма локализации производится путем анализа зависимости количества итераций от размещений микрофонов, начального приближения и допустимого отклонения между расчетами итераций.

В четвертой главе представлен метод разработки вычислительной системы акустического сенсорного устройства ввода информации. Предлагаемый метод включает шесть этапов, каждый из которых включает две основные процедуры – анализ и синтез, которые тесно взаимосвязаны друг с другом. Анализ подразумевает обзор исходных данных и требований, расчеты, моделирование и другие действия. Синтез включает элементы проектирования, конструирования, сборки, тестирования и т.д. Этапы делятся на две группы: аналитические и проектно-технологические. Процедуры, заложенные в этих этапах, позволяют разработчику вернуться назад в случае отклонений, чтобы провести углубленную оценку параметров, не вошедших в допустимые значения при разработке.

Отличием предлагаемого метода от аналогичных является комплексный подход: итеративность, разбиение на аналитические и проектно-технологические этапы, взаимосвязанность процедур анализа и синтеза на каждом этапе, направленность на практическую реализацию и внедрение.

В состав аналитических этапов входят:

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

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

Этап 3: моделирование устройства и применяемой вычислительной системы, определение их параметров. На этом этапе проводится моделирование воздействий окружающей среды (температура, туман, удар и т.д.) на поверхности из выбранных материалов. Анализируются возможные места размещения микрофонов под поверхностью экрана и кнопок на поверхности. Проводится моделирование сигналов, поступающих по координатам, где будут располагаться регистрирующие устройства. Определяется необходимость усиления или фильтрации сигналов. Вносятся правки в коррекцию приближенного решения численной модели в соответствии с изначально заданной допустимой погрешностью определения точки касания. Про-

цедуры, входящие в аналитические этапы, отражены во фрагменте алгоритма применения метода (рисунок 8).

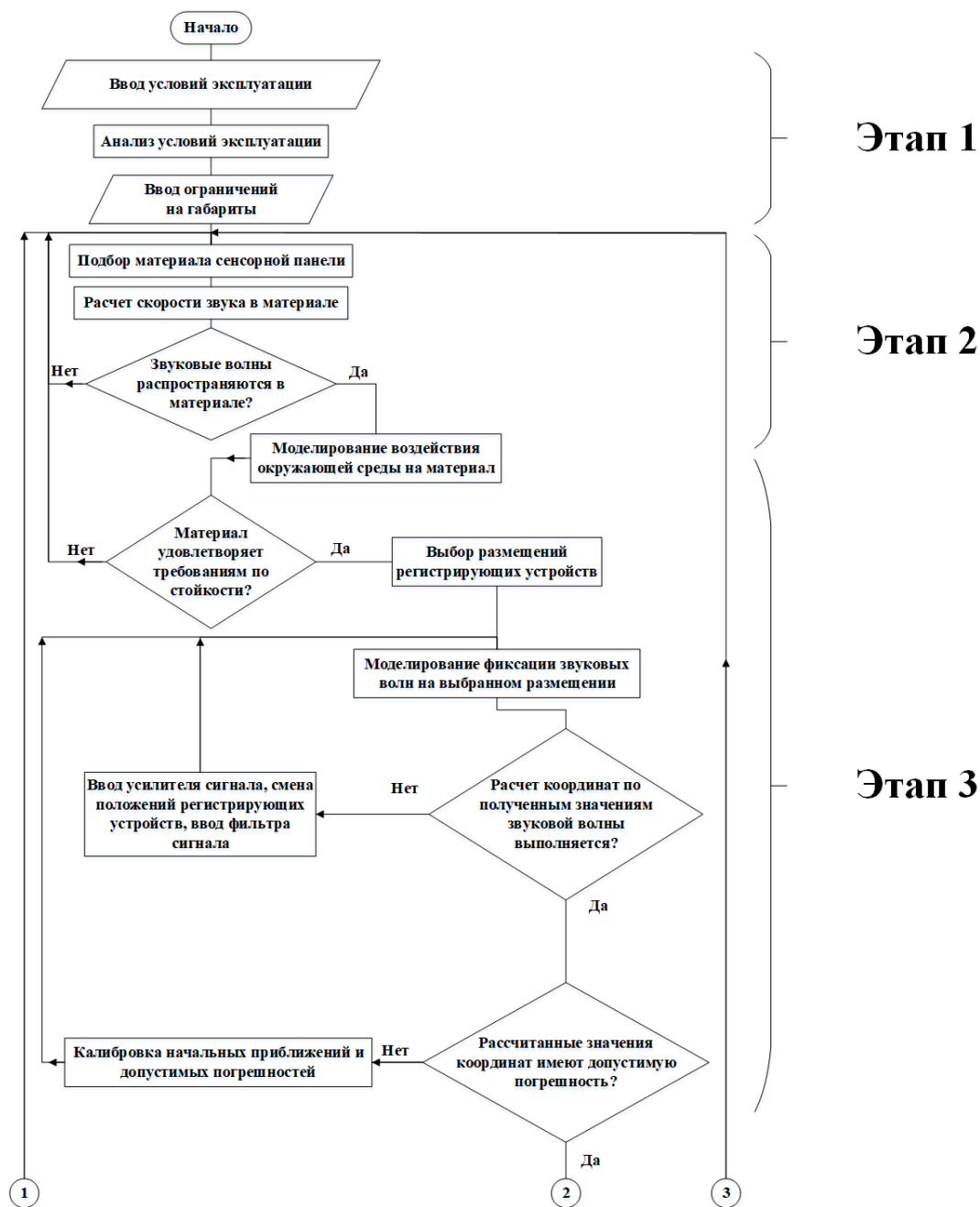


Рисунок 8 – Фрагмент алгоритма применения метода разработки вычислительных систем акустических устройств ввода информации

Проектно-технологические этапы в большей степени ориентированы на работу с физическим образцом и его испытаниями и в их состав входят:

Этап 4: проектирование вычислительной системы. На основании ранее полученных расчетов и данных на этом этапе необходимо выбрать критерии для выбора АЦП, фильтров, усилителей, микроконтроллера и т.п. Помимо этого на данном этапе разрабатывается схемотехническое представление вычислительной системы. 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 внести коррективы.

Этап 6: испытание вычислительной системы на опытном образце. Когда все компоненты системы будут приобретены и 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 определить компоненты, повлиявшие на эти результаты, и установить причины. Затем следует вернуться к этапу анализа, на котором был выбран повлиявший компонент, и провести коррекцию модели в соответствии с текущими возможностями. Процедуры, входящие в проектно-технологические этапы, отражены во фрагменте алгоритма применения метода на рисунке 9.

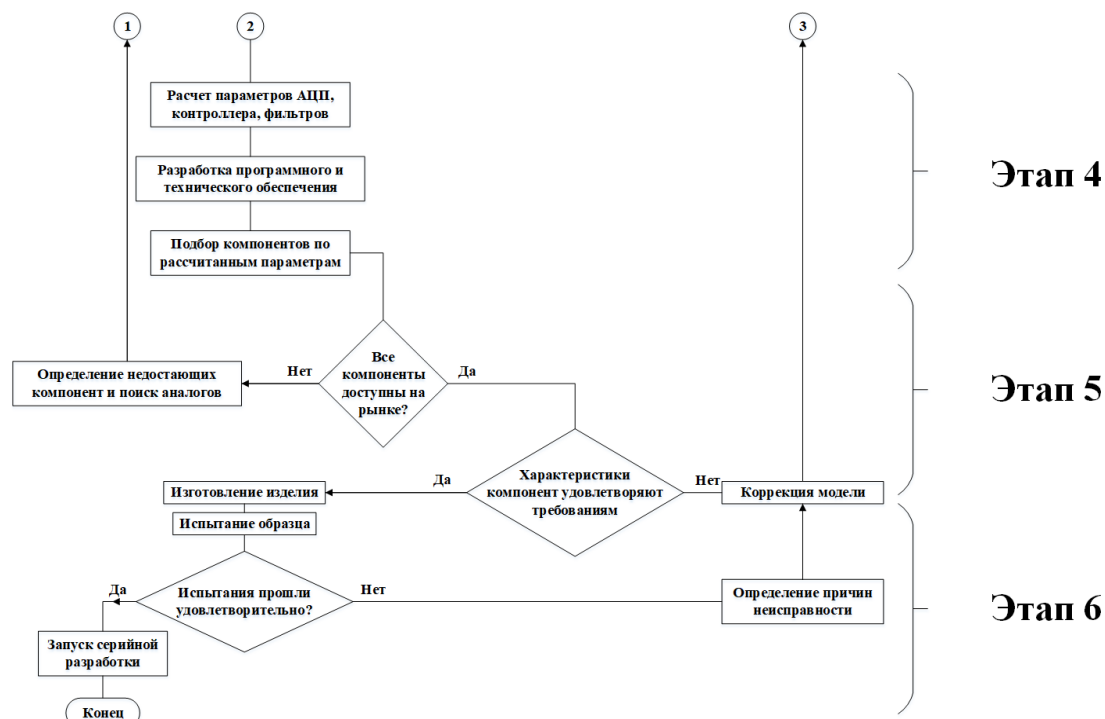


Рисунок 9 – Фрагмент алгоритма применения метода разработки вычислительных систем акустических устройств ввода информации

Предложенный метод разработки вычислительных систем акустических устройств ввода информации может быть адаптирован под широкий спектр входных данных и требований.

Пятая глава содержит данные об апробации и внедрении разработанных способа, моделей и метода на промышленном предприятии ПАО «ПНППК» и учебном процессе ФГАОУ ВО «ПНИПУ».

Для апробации результатов на ПАО «ПНППК» были созданы опытные образцы пультов управления с разработанным акустическим сенсорным устройством, заменившим существующую механическую (пленочную) клавиатуру. Структура вычислительной системы показана на рисунке 10.

Для реализации предложенной вычислительной системы для пультов управления в качестве сенсорной основы устройства выступает его корпус из стали марки СТЗСП5. Габариты активной части экрана: 16×6×0,3 см. В качестве регистрирующих устройств использовались пьезоэлектрические диафрагмы 2СFT- 9Т-

18,0A1-P+ прикрепленные к внутренней части корпуса изделия путем нанесения клея ВК-53. В качестве вычислительного элемента была применен микроконтроллер STM32F401RE. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой использованы микросхемы с 8-битным АЦП AD7904BRUZ.

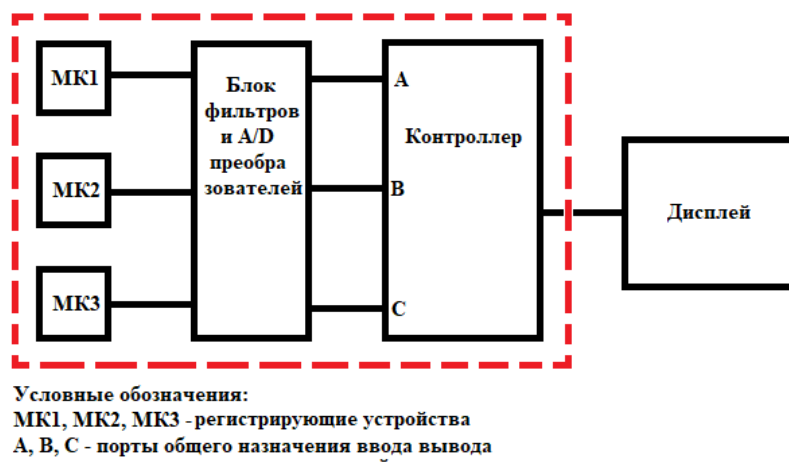


Рисунок 10 – Структура разработанной вычислительной системы

Пульты управления с разработанным устройством ввода содержат от двух до шести кнопок управления. Проведены испытания для проверки работоспособности (чувствительность, правильное срабатывание кнопок, допуск по дребезгу) в нормальных климатических условиях и при воздействии внешних факторов (температура, влажность, однократные и многократные удары).

По результатам испытаний выявлено, что, по сравнению с используемой ранее механической (пленочной) клавиатурой, применение разработанного акустического сенсорного устройства ввода позволило увеличить наработку на отказ (на 11 %), расширить 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», «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 C, C++, обработки сигналов в частности нахождения их экстремума и разработке микропроцессорных систем для направлений подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника», 27.03.04 «Управление в технических системах».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена разработке вычислительной системы сенсорных устройств ввода информации на основе акустических измерительных преобразователей.

В рамках проведенного исследования получены основные результаты:

1. Проведен аналитический обзор и анализ моделей, методов и инструментов реализации вычислительных систем сенсорных устройств ввода информации и

требований к ним, что позволило обосновать актуальность и детализировать задачи диссертационного исследования.

2. Разработан способ локализации места касания с помощью звуковых волн, распространяющихся по экрану (подложке) сенсорного устройства ввода информации, позволяющий уменьшить сложность технического и информационного обеспечения вычислительной системы.

3. Построены и верифицированы математические и программные модели локализации точки касания, дающие возможность снизить вычислительную сложность реализации алгоритмов расчета, повысив их быстродействие и точность.

4. Создан метод проектирования вычислительной системы сенсорного устройства ввода информации на основе акустических измерительных преобразователей, позволяющий повысить технологичность изготовления и улучшить эксплуатационно-технические характеристики изделия.

5. Проведена апробация и внедрение на предприятии ПАО «ПНППК» и в учебный процесс ФГАОУ ВО «ПНИПУ», что подтверждено актами.

Результаты работы могут быть востребованы для улучшения эксплуатационно-технических характеристик вычислительных систем акустических сенсорных устройств ввода информации широкого спектра применения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях

1. 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. – DOI 10.15593/2224-9397/2024.4.06.

2. 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.

3. 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.

Публикация в издании, индексированном в международной базе цитирования

4. 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 января 2022 года. – St. Petersburg, 2022. – P. 349-351. – DOI 10.1109/ElConRus54750.2022.9755516 (Scopus).

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

5. 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.

6. 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: ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Прочие публикации

7. Козин, А.В. Исследование и разработка макета идеоцентрической навигационной системы на базе сервисного робота «Промобот» / А.В. Козин, О.В. Гончаровский // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы Всероссийской научно-технической конференции: в 2 т., Пермь, 09-11 июня 2021 года. Том 1. – 2021. – Пермь: Изд-во ПНИПУ. – С. 181-184.

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.

9. 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, практика. – 2025.

Режим

доступа:

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