

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»



Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Робототехники и технических средств автоматизации

Куаныш Дарина

Исследование работы акустической системы классификации
материалов

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

6B07111 – Робототехника и мехатроника

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»



SATBAYEV
UNIVERSITY

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Робототехники и технических средств автоматизации

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой РТиТСА
кандидат технических наук,
профессор
Ожигенов К. А.
«06» 06 2025 г.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

На тему: «Исследование работы акустической системы классификации
материалов»

6B07111 – Робототехника и мехатроника

Выполнила

Рецензент

Ph.D. ассоциированный профессор
Муратов М. М.

«30» май 2025 г.

Куаныш Д.

Научный руководитель
Доктор Ph.D., кандидат
технических наук
старший преподаватель
Алтай Е. А.,

«30» май 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»



SATBAYEV
UNIVERSITY

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Робототехники и технических средств автоматизации

6B07111 – Робототехника и мехатроника



ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Студентке Куаныш Д.

Тема: Исследование работы акустической системы классификации материалов

Утверждена приказом ректора _____ № 621-70 от «13» 11 202 г.

Срок сдачи законченной работы _____ «30» 05 2025 г.

Исходные данные к дипломному проекту: Python, Arduino

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов:

- а) Выполнить обзор акустических методов анализа материалов;
- б) Разработать систему регистрации акустических сигналов от материалов;
- в) Разработать алгоритм оценки параметров акустических сигналов от материалов;
- г) Провести измерения и оценку параметров акустических сигналов от материалов;
- д) Провести классификацию акустических сигналов от материалов.

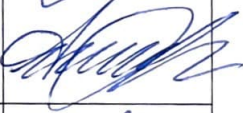
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):
представлены 18 слайдов презентации работы

Рекомендуемая основная литература: 2 наименований

ГРАФИК подготовки дипломной работы (проекта)

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечания
Анализ предметной области	04.03.2025	
Разработка системы регистрации акустических сигналов от материалов	12.04.2025	
Алгоритм оценки параметров акустического сигнала	30.04.2025	
Классификация акустических сигналов от материалов	14.05.2025	

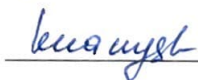
Подписи
консультантов и норм контролера на законченную дипломную работу (проект) с указанием относящихся к ним разделов работы (проекта)

Наименование разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Норм контролер	Кальменов Е. Т., магистр технических наук, старший преподаватель	05.06.2025	
Анализ предметной области	Алтай Е. А., доктор PhD, кандидат технических наук, старший преподаватель	4.03.2025	
Разработка системы регистрации акустических сигналов от материалов	Алтай Е. А., доктор PhD, кандидат технических наук, старший преподаватель	12.04.2025	
Алгоритм оценки параметров акустического сигнала	Алтай Е. А., доктор PhD, кандидат технических наук, старший преподаватель	30.04.2025	
Классификация акустических сигналов от материалов	Алтай Е. А., доктор PhD, кандидат технических наук, старший преподаватель	14.05.2025	

Научный руководитель:

 Алтай Е. А.

Задание приняла к исполнению обучающаяся:

 Куаныш Д.

Дата

«5» 06 2025

АҢДАТПА

Бұл зерттеу материалдарды акустикалық сипаттамалары бойынша жіктеу жүйесін әзірлеуге арналған.

Бүгінде материалдарды жіктеу және сұрыптау үшін бірқатар әдістер қолданылады: мысалы, бір типтегі материалдарды басқалардан ажырататын тәсілдер — металлды бөліп алу үшін магнит, қалқитын немесе шөгетін материалдарды шығару үшін әртүрлі тығыздықтағы сұйықтықтар; немесе компьютерлік көру арқылы материал түрін анықтайтын жасанды интеллектке негізделген жүйелер. Алғашқысы тек нақты объектілерге қолданылады, ал екіншісі тәжірибеде сирек пайдаланылады, өйткені оларды іске асыру қиын және күрделі.

Акустикалық әдіс дәстүрлі және жоғары технологиялық жедел жіктеу әдістерінің арасындағы бос орынды толтыра алады. Себебі бұл әдіс деректерді талдау және жүйеге енгізу жағынан модельді оқытуға қарағанда аз уақыт талап етеді. Сонымен қатар, ол физикалық параметрлері ұқсас емес материалдарды да жіктей алады, бұл механикалық немесе физика-химиялық әдістерді қолдануға мүмкіндік бермейді.

Сигналдарды өңдеу жүйесін іске асырғаннан кейін, жіктеу үшін ең маңызды міндет — рұқсат етілген сипаттамалары бар сүзгіні таңдау. Сондықтан осы жұмыста сүзгіні сынау мен талдауға ерекше назар аударылды. Өлшеулер арасындағы байланысты бағалау үшін математикалық статистика мен ықтималдық теориясы негізінде корреляциялық талдау әдісі таңдалды, сондай-ақ оның маңыздылығы (кездейсоқ еместігі) p -мәні арқылы бағаланды. Қарастырылған каскадты сүзгілеу (редукция) әдісінің өнімділігін бағалау үшін сигнал/шу қатынасы есептелді.

Ағаш, болат, тот баспайтын болат, ПВХ, ПЭТ және полиэтилен материалдарынан алынған акустикалық сигналдардың өңделген параметрлерін жіктеу сызбасы жасалып, ұсынылды. Әр параметр бойынша үш ішкі класқа топтау жүргізілді, бұл тұрмыстық және құрылыс салаларында жиі кездесетін аталған материалдардың акустикалық қасиеттерін сипаттауға мүмкіндік берді.

АННОТАЦИЯ

Настоящее исследование посвящено разработке системы классификации материалов по акустическим характеристикам.

Сегодня для классификации и сортировки материалов применяются либо методы, отделяющие один тип материалов от прочих, например, магнит для извлечения металла, жидкости различных плотностей для извлечения всплывающих или наоборот оседающих материалов; либо системы на основе искусственного интеллекта, определяющие тип материала с помощью компьютерного зрения. Первые применимы только к специфическим объектам, вторые на практике редко используются, ввиду сложности реализации системы, способной в данных условиях

Акустический метод может занять пустующую промежуточную позицию между традиционными и высокотехнологичными методами быстрой классификации объектов и материалов, так как анализ и введение данных в систему требует времени на несколько меньше, чем обучение модели, а также способен совмещать классификацию материалов, не обладающих достаточно сходящимися физическими параметрами для эффективного внедрения одного из механических и физико-химических методов.

Первостепенной задачей для классификации, после реализации системы обработки сигналов для измерения его параметров, является селекция фильтра с допустимыми характеристиками, поэтому тестированию и анализу фильтра в настоящей работе уделяется особое внимание. Базируясь на аппарате математической статистики и теории вероятности для оценки связи между измерениями обоснован выбор именно корреляционного анализа, а также оценка его значимости (неслучайности), выражаемого через уровень p -значимости модели, оценка отношений сигнал/шум для оценки производительности рассматриваемого метода каскадной фильтрации (редукции).

Разработана и предложена схема классификации параметров обработанных акустических сигналов от материалов, а именно от дерева, стали, нержавеющей стали, ПВХ, ПЭТ и полиэтилена, которые были сгруппированы на три подкласса по каждому параметру, что позволило охарактеризовать акустические свойства проанализированных материалов, которые достаточно широко встречаются в бытовой и строительной сферах деятельности человека.

ABSTRACT

The present study is dedicated to the development of a material classification system based on acoustic characteristics.

Currently, material classification and sorting are typically performed using methods that separate one type of material from others — for example, magnets for extracting metal, or liquids of varying densities for separating floating or sinking materials. Alternatively, artificial intelligence systems using computer vision are employed to determine the material type. The former are only applicable to specific objects, while the latter are rarely used in practice due to the complexity of implementing a system capable of functioning under real-world conditions.

The acoustic method can fill the gap between traditional and high-tech methods of rapid material and object classification. This is because the time required to analyze and input data into the system is significantly shorter than the time needed to train a machine learning model. Additionally, it can classify materials whose physical parameters are not sufficiently similar to make mechanical or physico-chemical methods effective.

After implementing a signal processing system to measure signal parameters, the primary task for classification becomes selecting a filter with acceptable characteristics. Therefore, particular attention in this work is devoted to the testing and analysis of filters. Based on mathematical statistics and probability theory, correlation analysis was chosen to assess the relationship between measurements. The significance (non-randomness) of this analysis is expressed through the model's p-value. Signal-to-noise ratio was also assessed to evaluate the performance of the proposed cascade filtering (reduction) method.

A classification scheme has been developed and proposed for the parameters of processed acoustic signals from materials such as wood, steel, stainless steel, PVC, PET, and polyethylene. Each material's parameters were divided into three subclasses, allowing for the characterization of the acoustic properties of these materials, which are commonly found in household and construction environments.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Анализ предметной области	7
1.1 Физические основы распространения звуковых волн в пространстве	7
1.2 Обзор акустических методов анализа материалов	8
2 Разработка системы регистрации акустических сигналов от материалов	10
2.1 Система регистрации акустических сигналов	10
2.2 Выбор и управление исполнительным механизмом	14
2.3 Определение параметров системы обработки акустического сигнала	18
3 Разработка алгоритма оценки параметров акустических сигналов от материалов	30
3.1 Алгоритм оценки параметров акустического сигнала	30
3.2 Оценка мощности	31
3.3 Оценка амплитуды	33
3.4 Оценка частоты	34
3.5 Оценка распределения	36
4 Классификация акустических сигналов от материалов	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	41
Перечень принятых сокращений, терминов	42
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	43
Приложение А	47
Приложение Б	49
Приложение В	51
Приложение Г	52
Приложение Д	53
Приложение Е	54
Приложение Ж	55
Приложение З	56
Приложение И	57
Приложение К	58
Приложение Л	60

ВВЕДЕНИЕ

Акустический сигнал, возникающий при взаимодействии с материалом, несет информацию о физических свойствах среды, а значит выявление различных компонентов сигнала позволит классифицировать их материалы по отклику [1]. Американский физик Р. Б. Линдсей изобразил положение разделов акустики относительно других наук и отраслей культуры в виде круговой диаграммы, где приближение ко внешнему краю ведет от теории акустики к иным областям знаний [2].



Рисунок 1 – диаграмма связи акустики с другими областями знаний [2]

Положения акустики уже применяются для экстракции полезной информации во многих сферах науки, включая не имеющую права на ошибку медицину.

На сегодняшний день большинство методов сортировки материалов и объектов представляют из себя визуальные, физико-химические и механические методы идентификации нескольких типов объектов. Самый простой метод представляет из себя линии ручного отбора, это время- и трудозатратный процесс, который не гарантирует безопасность от промахов – ошибок человека. При воздушной сепарации сепараторами выступают воздушные потоки, отделяющие материалы основываясь на их массе или плотности. Магнитная сепарация выделяет из общей массы объектов ферромагнитные материалы, однако способ неприменим к таким металлам как алюминий, нержавеющая сталь и медь. Еще более специфичным методом является вихретоковая сепарация, выделяющая проводники: когда металл проходит над магнитным ротором в металле образуются вихревые токи. Полярность создаваемого магнитного поля совпадает с полярностью сепаратора, что отталкивает испытуемый материал.

Плотностный сепаратор классифицирует объекты по трем категориям: плотность, размер, форма; когда операторы контролируют хотя бы две характеристики, метод позволяет точно сортировать сложные вещества [3].

В последние годы, естественно, прибегают к нейросетевым моделям, однако широко известно, каким образом они могут ошибаться, особенно если для них не предусмотрена возможность ошибиться или если основаны на галлюцинирующих больших языковых моделях.

Для разработки акустического метода классификации материалов необходимо выполнить следующие задачи:

- 1) Разработать физически реализуемый макет системы регистрации акустических сигналов от материалов;
- 2) Составить алгоритм оценки потоков акустической сигнальной информации;
- 3) Спроектировать систему для фильтрации зашумленных измерений;
- 4) Составить классификацию материалов на основе оценки параметров их акустических сигналов.

Данная задача рассматривается как подсистема для робототехнической системы, предназначенной для автоматизированной сортировки материалов, не пригодных к эксплуатации. Среди подобных материалов наиболее часто встречающимися в строительной индустрии и бытовой деятельности являются дерево, сталь, нержавеющая сталь, поливинилхлорид, полиэтилентерефталат и полиэтилен. В связи с этим для оценки акустических характеристик обоснован выбор именно данных материалов.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

В первой главе выстраивается теоретическая база, необходимая для понимания физических процессов, лежащих в основе практического анализа акустических сигналов. Эти положения служат фундаментом для дальнейшей разработки алгоритмов классификации сигналов от материалов.

1.1. Физические основы распространения звуковых волн в пространстве и материалах

Передавать колебательные движения способен не только воздух, но и любая сплошная среда, которую можно считать достаточно упругой относительно возможности передать акустический сигнал. Основным показателем сигнала является частота, определяемая как количество повторов события за установленный промежуток времени. Для акустических колебаний не рассчитывают энергию в классическом смысле, в данном случае мерой является амплитуда отклонения, так как большей амплитуде соответствует более высокий уровень энергии [2]. Мерой звуковой энергии также может служить звуковое давление, которое появляется в результате смещения молекул среды и измеряется в Н/м²:

$$p = \rho * c * v \quad (1)$$

Скорость распространения акустических волн зависит от инертных свойств среды и её упругости, определяется по как квадрат из отношения модуля сжатия среды к средней плотности среды [xx]:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2)$$

Обычно значением скорости распространения звука по умолчанию принимают 340 м/с, однако, как было сказано ранее, акустический сигнал передается в упругой среде, то есть за счет возбуждения колебаний в среде, что означает, скорость звука зависит от количества энергии в среде – температура среды влияет на скорость распространения звуковых волн [3].

Переход акустической волны в другую среду сопровождается потерей части энергии, но незначителен, если удельные акустические сопротивления сред в достаточной мере количественно близки [4]. При этом соотношение отношений угла падения к углу преломления и скоростей звука тождественны:

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (3)$$

Ослабление звуковых волн обосновано потерей энергии при молекулярном затухании в среде, в которой распространяется волна. С ростом частоты коэффициент вязкости среды усиливает затухание. Для различных сред формула

затухания имеет разный вид, например, для волн, распространяющихся в воздухе, формула выглядит следующим образом:

$$N_B = 1.715 * 10^7 \frac{f^2}{\rho C^2} \left[\frac{4}{3} \eta + (\nu - 1) \frac{\zeta}{C_p} \right] \quad (4)$$

Понимание процессов формирования звукового сигнала и его модификации при прохождении через твёрдый материал является необходимым условием для разработки метода классификации материалов по акустическим признакам. Дальнейшее исследование будет посвящено преобразованию непрерывного сигнала в числовые описания и их интерпретации.

1.2 Обзор акустических методов анализа материалов

Акустические методы испытания – один из видов неразрушающего контроля. Ультразвуковой, резонансный и ударный методы считаются самыми развитыми, главным образом они внедрены в сферы строительства и промышленности [5].

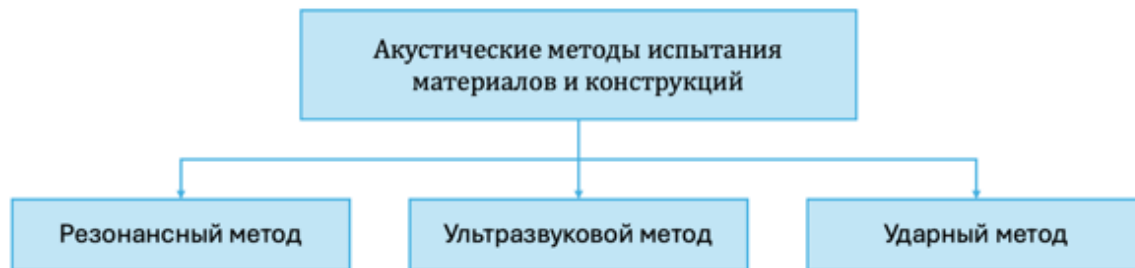


Рисунок 2 – акустические методы испытания материалов и конструкций

Резонансный метод позволяет анализировать свойства материала или конструкции через определение динамического модуля упругости, являющегося характеристикой прочности, по частоте колебаний в сигнале от образца. Вибрационный метод в основном применяется в лабораторных условиях. К образцу прикладывается возбудитель колебаний, конец образца связывается с датчиком, регистрирующим колебания, он соединяется с системой визуализации или записи данных. Вибрационный метод хорош подходит для измерения свойств образцов, подвергаемых воздействиям извне или находящихся на стадии твердения [5].

При применении ультразвукового метода измеряется скорость распространения ультразвуковых импульсов, через которые возможно рассчитать динамический модуль упругости для всей толщины или некоторого участка. Возбудитель вырабатывает кратковременные электрические импульсы, впоследствии в образце генерируются ультразвуковые колебания. Электрический сигнал на выходе датчика усиливается и подводится к вертикальным пластинам электроннолучевой трубки, благодаря чему сигнал можно визуализировать [5].

Ударный метод главным образом применяется для испытания аэродромных и дорожных покрытий. На поверхности образца на известном расстоянии устанавливается пара датчиков, что позволяет регистрировать разность между временем достижения волной первого датчика и временем до достижения второго [5].

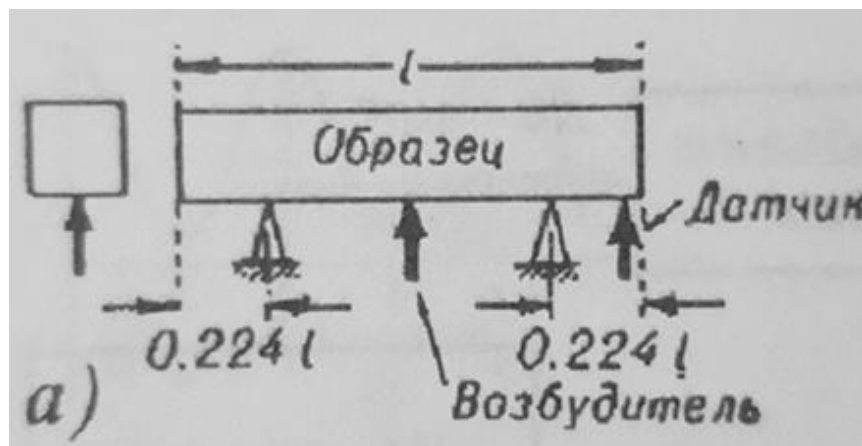


Рисунок 3 – элементы резонансного метода [5]

В основу данного исследования лег резонансный или метод. Углубленное исследование системы регистрации акустических сигналов приведено в главе 2, однако для пояснения к схеме стоит заранее отметить, что возбудителем выступает исполнительный механизм, а датчиком – измерительный микрофон, он имеет акустическую связь с образцом и ему не требуется прямой контакт с ним.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ МАТЕРИАЛОВ

В рассматриваемой главе настоящей дипломной работы представлены результаты разработки системы регистрации акустических сигналов от материалов для оценки их характеристик. Обоснован выбор структурных и электрических элементов и компонентов разрабатываемой системы регистрации данных сигналов.

2.1. Система регистрации акустических сигналов

Электронное управление реализуется с помощью платформы для прототипирования, на которой собрана электрическая схема управления исполнительным механизмом и системой записи звука. Возбудителем выступает представляет исполнительный элемент, о нем позже в разделе 2.2.



Рисунок 4 – архитектура системы регистрации акустических сигналов от материалов

Первой частью алгоритма является «уровень измерения сигнала», где и расположен исполнительный механизм, а также другие модули, включающие микропроцессорную систему на основе чипа M1 Max, микроконтроллер ATmega328. Датчиком выступает микрофон, подробнее о выборе датчика будет рассказано ниже.

Таблица 1 – Сравнение характеристик микрофонов разных типов

Характеристика	Динамический	Конденсаторный	Ленточный
Чувствительность	Низкая и средняя (84-92 дБ)	Высокая (94-102 дБ)	Высокая (94-102 дБ)
Частотный диапазон	Узкий, слабеет на высоких частотах	Широкий, передает детали	Широкий на низких частотах
Шумоподавление	Хорошая устойчивость к шумам	Чувствителен к шумам, требует дополнительной защиты от паразитных шумов	Чувствителен к шумам и вибрациям.
Энергопотребление	Не требует фантомного питания	Требуется фантомного питания	Классическое модели не требуют питания, активные модели – да
Диаграмма направленности	Кардиоидная	Всенаправленная, кардиоидная	Двухсторонняя

Ленточный микрофон является подвидом динамического, но имеет схожие характеристики с конденсаторным. Неподходящим его делает то, что он чувствителен к направлению звука, что усложняет повторяемость измерений, а двухсторонняя направленность в данной системе может помешать, так как записываться будут и резонансные волны [6].

Динамические микрофоны обладают высоким уровнем устойчивости к шумам и в среднем более долговечны, но за счет этого менее чувствительны. Критической характеристикой является односторонняя направленность, так как геометрия исследуемых объектов недостаточно схожа, чтобы установить необходимое позиционирование микрофона [7].

Оптимальными характеристиками обладает Behringer ECM8000 – конденсаторный микрофон, обладающий частотно-независимой сферически-симметричной направленностью, чувствительностью в диапазоне от 15 Гц до 20 кГц. Важнейшим фактором является то, что данная модель является измерительным микрофоном, предназначенным для калибровки прочего

акустического оборудования – это значит, что Behringer ECM8000 не имеет встроенных функций, намеренно меняющих выходные данные.

Ниже представлены диаграмма направленности и график, отражающий чувствительность микрофона в дБ к звукам разной частоты. Устройство обладает почти плоским откликом за исключением подъемов в диапазоне 4,5–10 кГц.

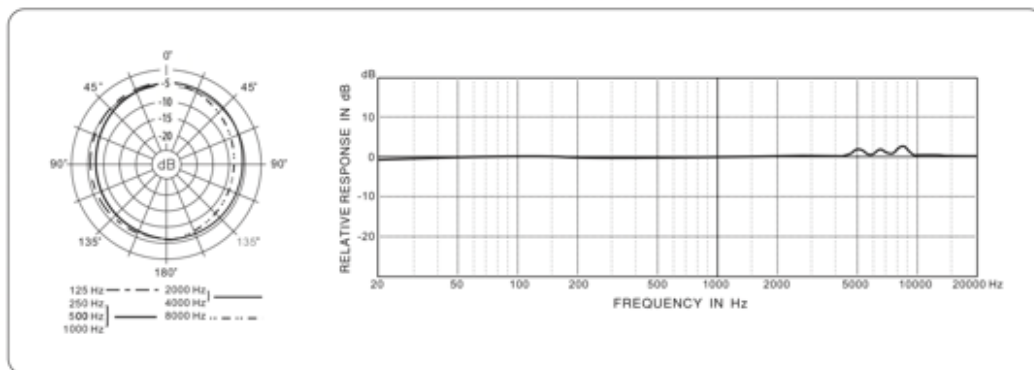


Рисунок 5 – диаграмма направленности и частотная характеристика Behringer ECM8000 [8].

Поскольку используемый микрофон относится к конденсаторному типу, для его корректного функционирования требуется наличие фантомного питания [8]. При этом качество промежуточного устройства должно соответствовать техническим характеристикам микрофона, поскольку недостаточное качество передачи может привести к искажению или потере значимой акустической информации [7].

Внешний источник необходим для поддержки конденсаторного микрофона, который не способен к записи без дополнительного фантомного питания [7], а также более высококачественного преобразования непрерывного сигнала в цифровой, понятный для данных систем обработки и выделения признаков [9]. Внешняя звуковая карта Focusrite Scarlett 2i2 представляет собой оптимальное решение для задач, связанных с высококачественной записью звука в рамках инженерных и исследовательских проектов. Выбор обусловлен сочетанием технических характеристик, надежности и широких возможностей интеграции с программным обеспечением [10].

Прежде всего, Scarlett 2i2 обеспечивает высокое качество аналого-цифрового преобразования благодаря 24-битному разрешению и частоте дискретизации до 192 кГц, что особенно важно при работе с акустическими сигналами, содержащими широкий частотный диапазон и требующими высокой точности воспроизведения [10]. Такие параметры позволяют сохранить все значимые характеристики аудиосигнала, что критично для последующей обработки и анализа, в частности — в задачах машинного обучения и классификации [10, 11].

Устройство оснащено двумя предусилителями с поддержкой фантомного питания +48 В, что делает его полностью совместимым с конденсаторными микрофонами, включая Behringer ECM8000, применяемый в данном проекте [10]. Предусилители Scarlett 2i2 отличаются низким уровнем собственных

шумов и высоким динамическим диапазоном, что позволяет проводить запись с минимальными искажениями даже в условиях низкого уровня сигнала [8, 10].

Дополнительным преимуществом Scarlett 2i2 является его широкая поддержка в операционных системах Windows, macOS и Linux, а также наличие официальных драйверов и стабильная работа с популярными библиотеками Python для обработки аудио, это обеспечивает удобную интеграцию с программной частью проекта и минимизирует время на настройку оборудования [10]. Таким образом, сочетание высоких технических характеристик, совместимости с профессиональными микрофонами, а также простоты использования и интеграции делает Focusrite Scarlett 2i2 обоснованным и эффективным выбором в рамках задач по захвату и анализу акустических сигналов [7, 10].

Сборка акустического оборудования не имеет смысла без грамотного программного обеспечения. Приобретение продукции Focusrite серии Scarlett обеспечивает совместимой с аппаратурой цифровой рабочей станцией Ableton LiveLite [10], однако в рамках данной дипломной работы применение заранее запрограммированной станции имеет меньше смысла, чем разработка собственного алгоритма (рисунок 5) в силу того, что данная группа программного обеспечения обладает слишком обширным функционалом, который данный алгоритм будет лишь нагружать.

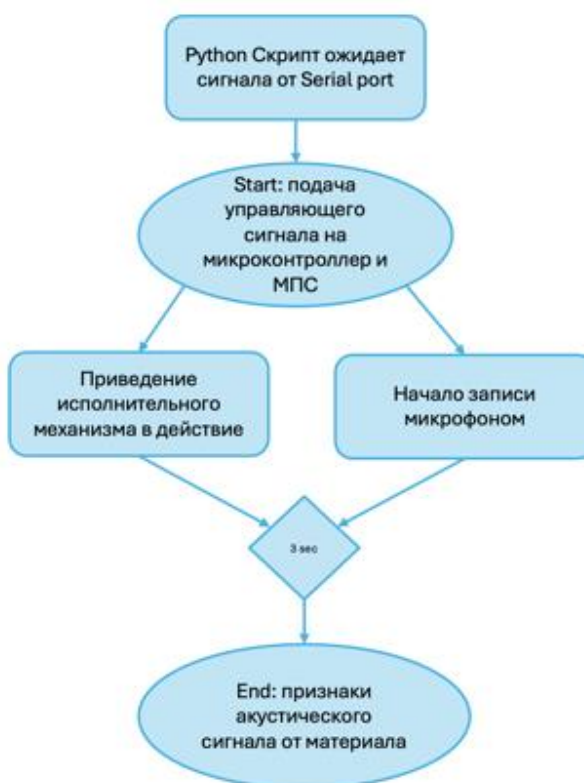


Рисунок 6 – алгоритм действия системы на уровне измерения сигнала

На микроконтроллер уже загружен скрипт подачи сигнала на исполнительный механизм и serial port при взаимодействии с кнопочным

элементом управления. Python-скрипт реализован с помощью специальной библиотеки, объединяющей аппаратуру микроконтроллерной платформы [12], на данном этапе он не предусматривает фильтрацию и не обрезает длительность сигнала, которая длится около секунды. Полный листинг кода для данного алгоритма представлен в Приложении А, дополнительно к нему предоставлено Приложение Б, предоставляющее листинг кода для микроконтроллера.

2.2. Выбор и управление исполнительным механизмом

При подборе оптимального решения для преобразования электрической энергии в механическое перемещение важно оценить не только динамические характеристики, но энергоэффективность, комплексность конструкции, доступность элемента и в данном случае – вибрации. В проекте от исполнительного механизма помимо прочего зависела конструкция камеры, внутри которой записывается звук, что ввиду необходимости сбора большого объема данных маркирует конечный вид прототипа. Главными параметрами при выборе исполнительного механизма для проекта решающим фактором стала возможность генерации достаточно громкого удара, что напрямую зависит от скорости движения штока. При анализе допустимых вариантов выбор свелся к двум элементам: линейному приводу и соленоиду с возвратной пружиной.

Линейный привод, как правило, основывается на использовании бесколлекторного или шагового двигателя, механической передачи и направляющих элементов [13]. Подобная зависимость от напряжения и мощности питания обеспечивает гибкость управления при наличии удобоваримых источника питания и системы управления мощностью, это расширяет библиотеку звуков, так как геометрия исследуемых объектов может варьироваться, завися только от максимума выдвижения штока [13]. В теории линейный привод позволяет получить большой рабочий ход, однако на практике, без учета экономических затрат, сложно найти аналогичный механизм, чья скорость выдвижения штока превышала бы 70 мм/с, чего недостаточно для порождения удара.

Соленоид представляет собой электромагнитное устройство, основным элементом которого является обмотка, создающая магнитное поле при пропускании через нее электрического тока [14]. Центральный якорь, изготовленный из магнитопроводящего материала, перемещается под действием магнитного поля, для возврата якоря в исходное положение применяется возвратная пружина [14]. Максимальный ход штока соленоидов составляет 10 мм в самых распространенных моделях – зачастую их применяют для сборки электронных замков, потому большего хода не требуется. Соленоид потребляет большее количество энергии и поступает она импульсно, потому контролировать его скорость значительно сложнее, однако существуют способы управления током в обмотке через широтно-импульсную модуляцию [15]. Предположительно, управление положением штока также реализуемо, однако при настолько малом максимальном ходе не имеет смысла. Главным

преимуществом соленоида является его скорость – шток выдвигается полностью за сотые доли секунды [15].

В итоге выбор стоит между гибким, но медленным, и быстрым, но жестким механизмами. Как упоминалось ранее, возможность сгенерировать достаточно громкий звук напрямую зависит от скорости движения штока, потому предпочтение безоговорочно отдается соленоиду.

Помимо соответствия базовым требованиям, стоит также рассмотреть паразитные шумы, порождаемые элементами, и способами их устранения. Оба механизма генерируют собственный шум, что при проектировании системы регистрации акустических данных необходимо брать в расчет. Стохастический акустический сигнал линейного привода представляет собой белый шум, сопровождающий весь период движения штока. Шум удара штока о корпус представляет собой резкий высокочастотный звук. В отличие от шума линейного привода, стук соленоида легко частично устранить механически – установив демпфирующую накладку на источник шума, что уже установлена на некоторых моделях для устранения вибраций.

Ниже представлена схема управления соленоидом, собранная в программе Proteus:

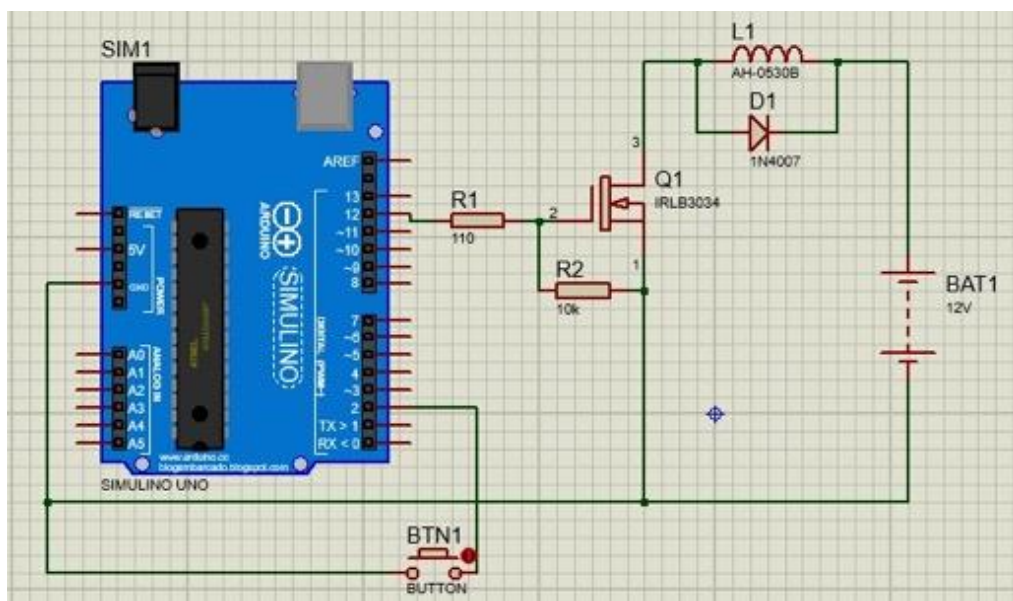


Рисунок 7 – электрическая схема управления соленоидом, созданная в программе Proteus.

Для управления мощной нагрузкой необходим транзистор типа МОП, полевой транзистор с изолированным затвором, обладающий логическим уровнем и N-каналом.

Таблица 2 – Сравнение параметров моделей транзисторов.

Параметр	IRLZ44N	IRL2203NPBF	IRL3705NPBF	IRLB3034PBF
----------	---------	-------------	-------------	-------------

Максимальное напряжение	55 В	30 В	55 В	40 В
Максимальный ток	47 А	55 А	75 А	195 А
Пороговое напряжение открытия стока	2 В	2.5 В	2 В	2.35 В
Мощность рассеяния	94 Вт	130 Вт	200 Вт	370 Вт

IRLZ44N – классический МОП-транзистор, часто выбирается в проектируемых схемах, чьи параметры еще не до конца определены, по умолчанию, он пригоден для большинства бытовых задач благодаря ограниченной мощности рассеивания [16].

IRL2203NPBF обладает ограниченным напряжением в 30 В, но компенсирует их отличными токовыми характеристиками и увеличенной мощностью рассеивания, благодаря низкому сопротивлению канала быстро переключает состояния [17].

IRLB3034PBF является усиленным логическим МОП-транзистором с высокой пропускной способностью и устойчивостью к нагреву, нередко применяется в схемах импульсных источников питания [18].

Оптимальными характеристиками обладает транзистор IRLB3034PBF, он обладает практически незначительным нагревом, имеет весьма высокие пороговое напряжение открытия стока и запасы напряжения и тока [19].

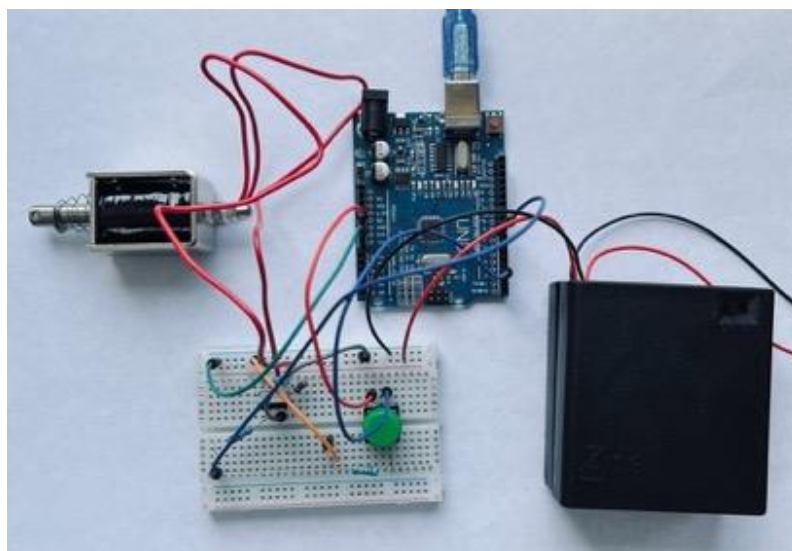


Рисунок 8 – физическая реализация электрической схемы

Диод выполняет функцию защиты схемы от обратного напряжения при отключении соленоида, его номинал не столько важен, сколько сама

возможность отрезать ток, Резистор R_2 защищает транзистор от нежелательного включения при подаче питания на схему [20].

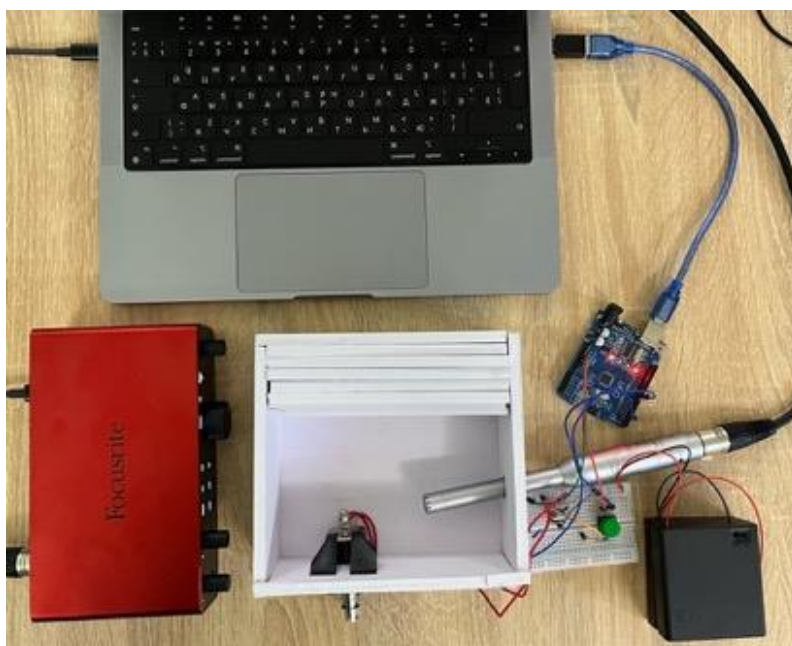


Рисунок 9 – физическая реализация системы регистрации сигналов

Как итог, система регистрирует богатый, но зашумленный акустоэлектрический сигнал. Часто при необходимости устранить реверберацию в первую очередь на ум приходит обкладка помещения акустическим изоляционным материалом – акустическим поролоном, минеральной ватой и прочим. Однако, например, известный акустический поролон пирамидального или клиновидного рельефа поглощают очень небольшой спектр частот и в профессиональных помещениях звукозаписи на поверхность в качестве дополнительной меры, а основные модули скрыты за декоративными стенам [21, 11]. Оптимальные инструменты поглощения реверберации, такие как бас-ловушка, становятся эффективными при специфичных условиях, продуманной установке и больших размерах, обычно ширины или диаметра от одного метра [22, 23].

Казалось бы, для небольшой камеры акустическое оформление должно быть меньших масштабов, однако теория гласит, что, чем меньше помещение, тем чаще в нем отражаются волны, а значит параметры, определяющие эффективность поглощения, нужно повышать. Кроме того, для низкочастотного шума ниже 500 Гц нет места для развития – стоячие волны и реверберация почти не формируются [11]. Учитывая габариты макета, имеет смысл отказаться от физических методов устранения реверберации и остановиться только на цифровой обработке.

2.3 Определение параметров системы обработки акустического сигнала

При исследовании акустических характеристик задача обработки сигнала является необходимостью, так как паразитные шумы вносят слишком значимое искажение в информативный сигнал. Выявление полезного сигнала на фоне мешающих – одна из самых распространенных постановок задачи при разработке фильтра [24].

Не без причины одним из самых известных типов рекурсивного фильтра является фильтр Баттерворта. Из существующих цифровых фильтров именно фильтр Баттерворта ближе прочих подошел к виду «идеальной» АЧХ, минимизирующей возникновение ряби в полосе пропускания [25]. К проектированию систем на основе полиномов Бесселя обращаются при необходимости в линейной фазо-частотной характеристике. Главной их особенностью является практически постоянное время групповой задержки, благодаря которому фильтр Бесселя обладает своими уникальными преимуществами [24]. Как показал публичный опыт, фильтры Чебышева имеют наименьшее значение максимальной ошибки аппроксимации в полосе пропускания [25]. Каждый из данных фильтров имеет нечто, имеющее во многом критическое значение для задачи обработки и анализа акустических сигналов, так как они являют собой комплексную информацию, потеря которой может означать утрату возможности выполнить цель настоящего исследования [26].

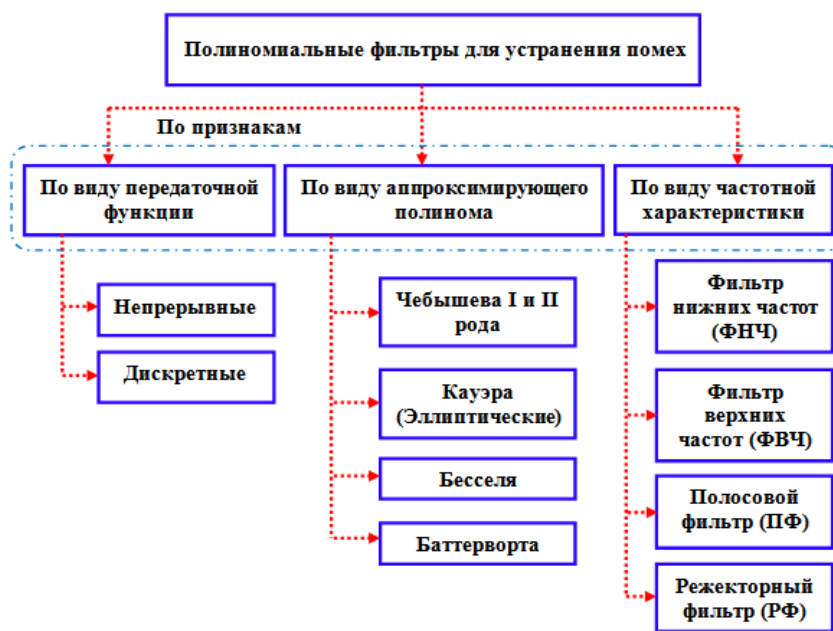
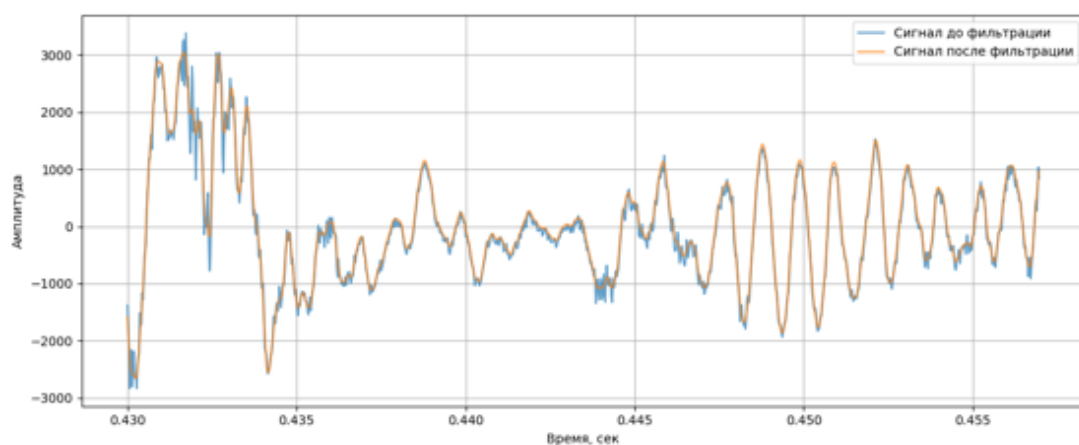
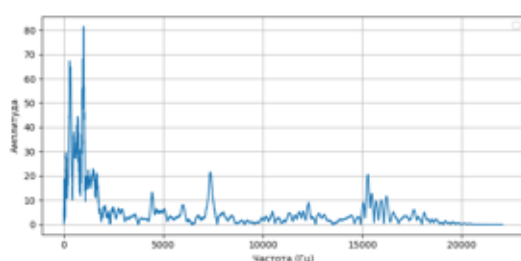


Рисунок 10 – классификация полиномиальных фильтров для устранения помех [29]

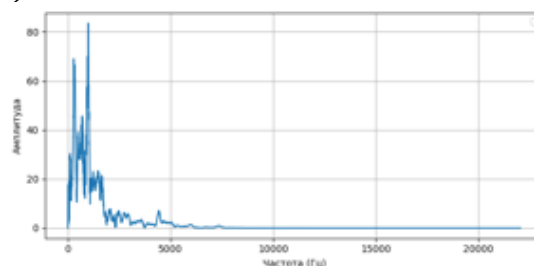
В данной работе для устранения неинформативных потоков применяются дискретный полосовой фильтр Баттерворта IV порядка. Для обоснованного выбора полосы подавления целесообразно провести анализ спектральных характеристик измеренных сигналов как во временной, так и в частотной областях [27].



а)



б)

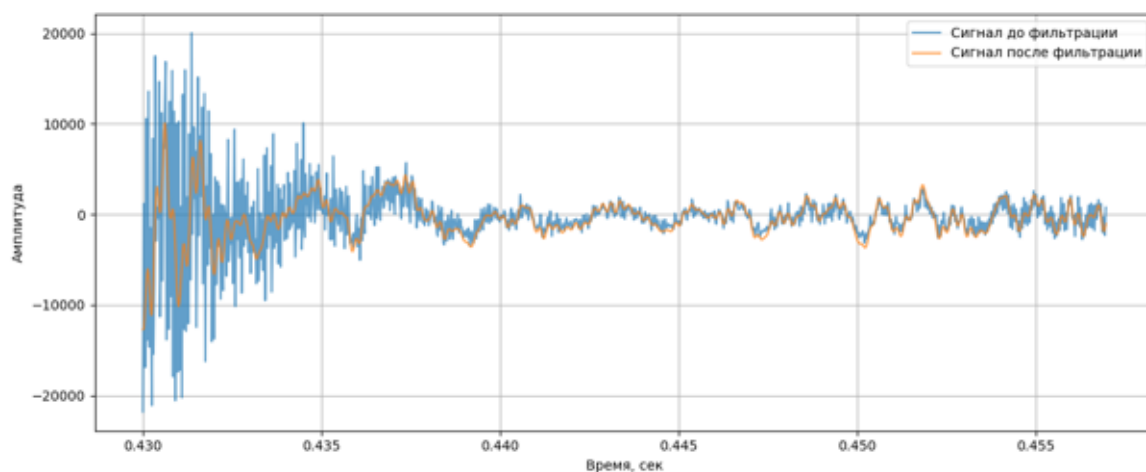


в)

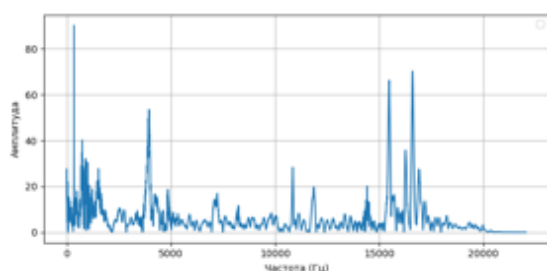
Рисунок 11 – акустический сигнал от дерева: а) до и после фильтрации в амплитудно-временной области; б) спектр до фильтрации; в) спектр после фильтрации

Сигналы от дерева являются собой, можно сказать, идеальный пример фильтрации сигнала: эффект от переходного искажения практически не затрагивает участки, несущие основную информацию.

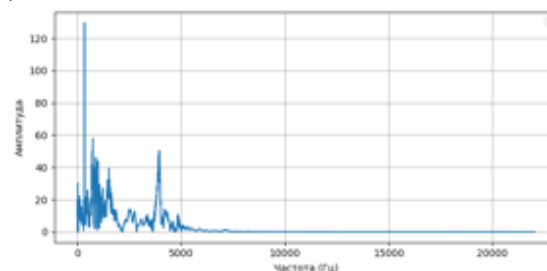
Каждый отфильтрованный сигнал в той или иной степени теряет высоту пика амплитуды, так как обработка полосовым фильтром Баттерворта предполагает сглаживание формы сигнала, поэтому считать переходное искажение по определению негативным эффектом является некорректным суждением. Для фильтра Баттерворта характерны линейная амплитудно-частотная характеристика и резкое подавление частот вне полосы пропускания, и в рассматриваемом случае он гипотетически может выступать источником нелинейности, однако не считается причиной нежелательных искажений.



а)



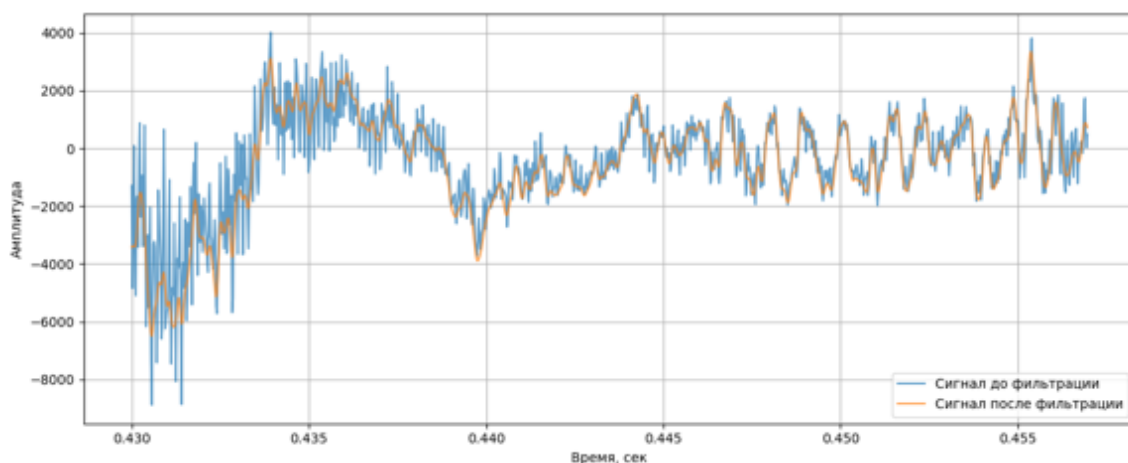
б)



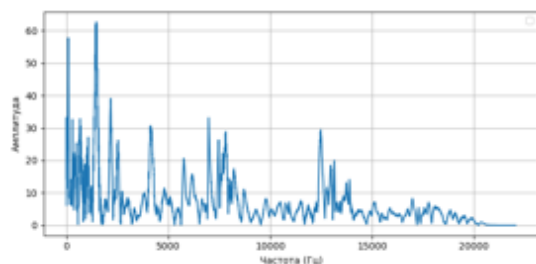
в)

Рисунок 12 – акустический сигнал от стали: а) до и после фильтрации в амплитудно-временной области; б) спектр до фильтрации; в) спектр после фильтрации

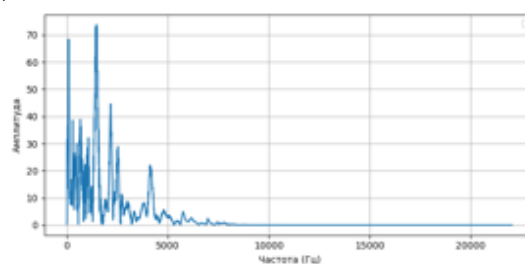
Сигнал до фильтрации содержит высокоамплитудные хаотичные колебания, что является признаком шума, так как из графика сигнала до фильтрации сложно выявить какую-либо информацию. На начальном участке виднеется уменьшение плотности пиков после обработки, высокочастотных компонентов в зашумленном сигнале гораздо больше, чем на графиках прочих групп, по форме начальный участок похож на фликкер-шум и лишь после фильтрации удастся экстрагировать из него какую-либо информацию. При этом на участке 0.435-0.450 разница между участками минимальна, что позволяет говорить о корректности рассматриваемой полосы пропускания для этого участка. Для этих измерений было срезано много шума, соответственно, на сигнале явна рябь: максимальная амплитуда до фильтрации не превышала 100, то пиковая амплитуда обработанного сигнала достигает 130.



а)



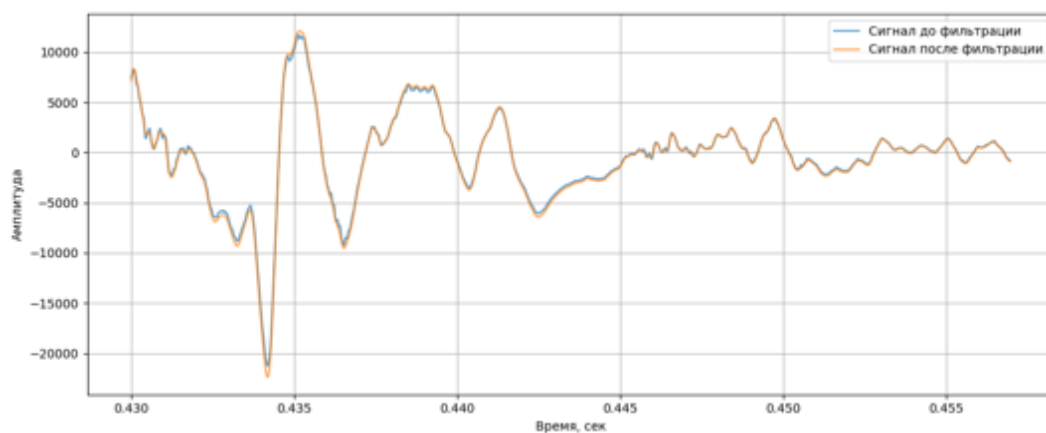
б)



в)

Рисунок 13 – акустический сигнал от нержавеющей стали: а) до и после фильтрации в амплитудно-временной области; б) спектр до фильтрации; в) спектр после фильтрации

На графиках сигнала от нержавеющей стали наблюдается ситуация, схожая с той, которая наблюдалась на графиках сигнала от стали, разве что высокочастотные компоненты менее выражено зашумляют сигнал. Отрицательные пики на графике выражены больше, положительная полуволна короче по времени и содержит меньше информативных составляющих. Имея меньше помех, отфильтрованный сигнал от нержавеющей стали менее выраженно подвергся влиянию переходных искажений.



а)

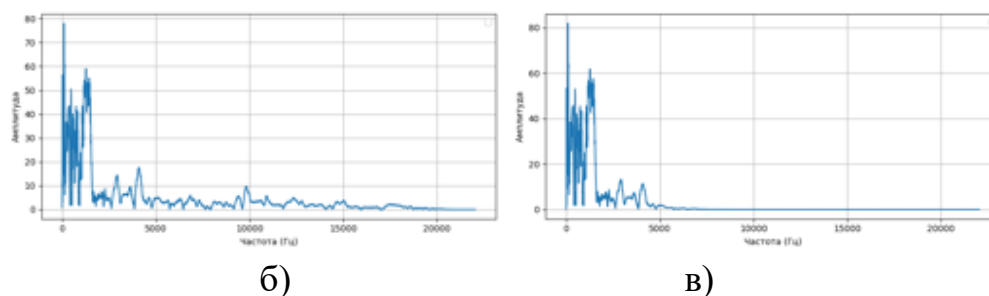


Рисунок 14 – акустический сигнал от поливинилхлорида: а) до и после фильтрации в амплитудно-временной области; б) спектр до фильтрации; в) спектр после фильтрации

Сигналы от поливинилхлорида демонстрируют одну из самых малых различимостей измерений до и после обработки, так как амплитуды вокруг и после частоты среза едва ли достигают отметки 20 – ряби не из чего возникнуть. В свою очередь, амплитуды на графике в практически не подвергаются переходным искажениям.

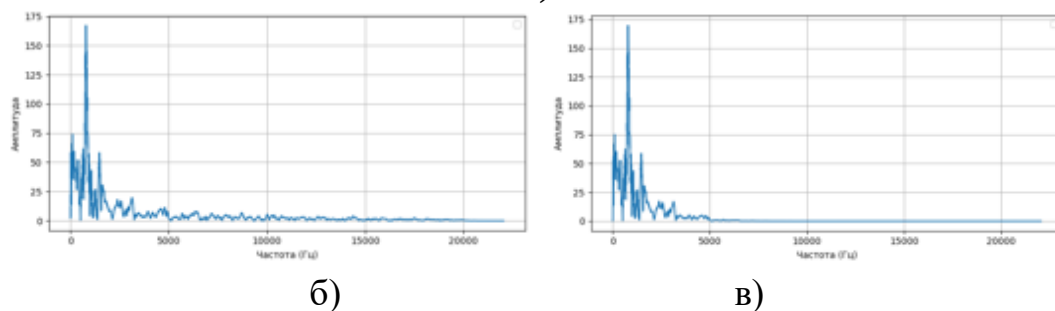
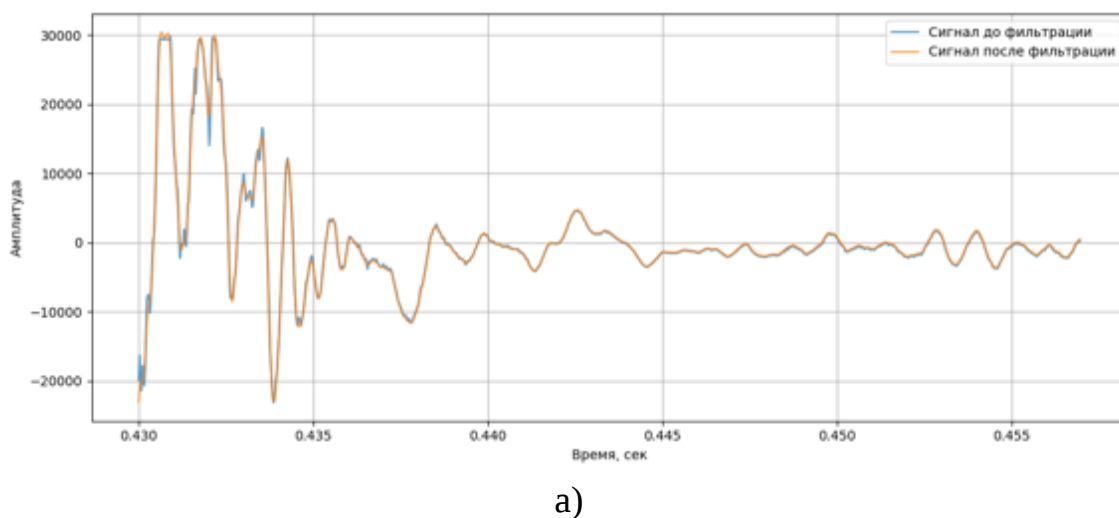


Рисунок 15 – акустический сигнал от полиэтилентерефталата: а) до и после фильтрации в амплитудно-временной области; б) спектр до фильтрации; в) спектр после фильтрации

Сигналы от полиэтилентерефталата имеют схожие выводы, что сигналы от поливинилхлорида: минимальная различимость в связи с изначальным отсутствием высоких амплитуд вне полосы пропускания, еще более незначительное изменение амплитуды.

Сигналы от полиэтилена представляют любопытный случай, так как в этом случае сигналы после фильтрации почти в два раза превышают амплитуды зашумленных измерений. Сразу обозначим, что для данной группы при предоставленной выборке эти результаты не являются случайными, а значит, не считаются ошибкой.

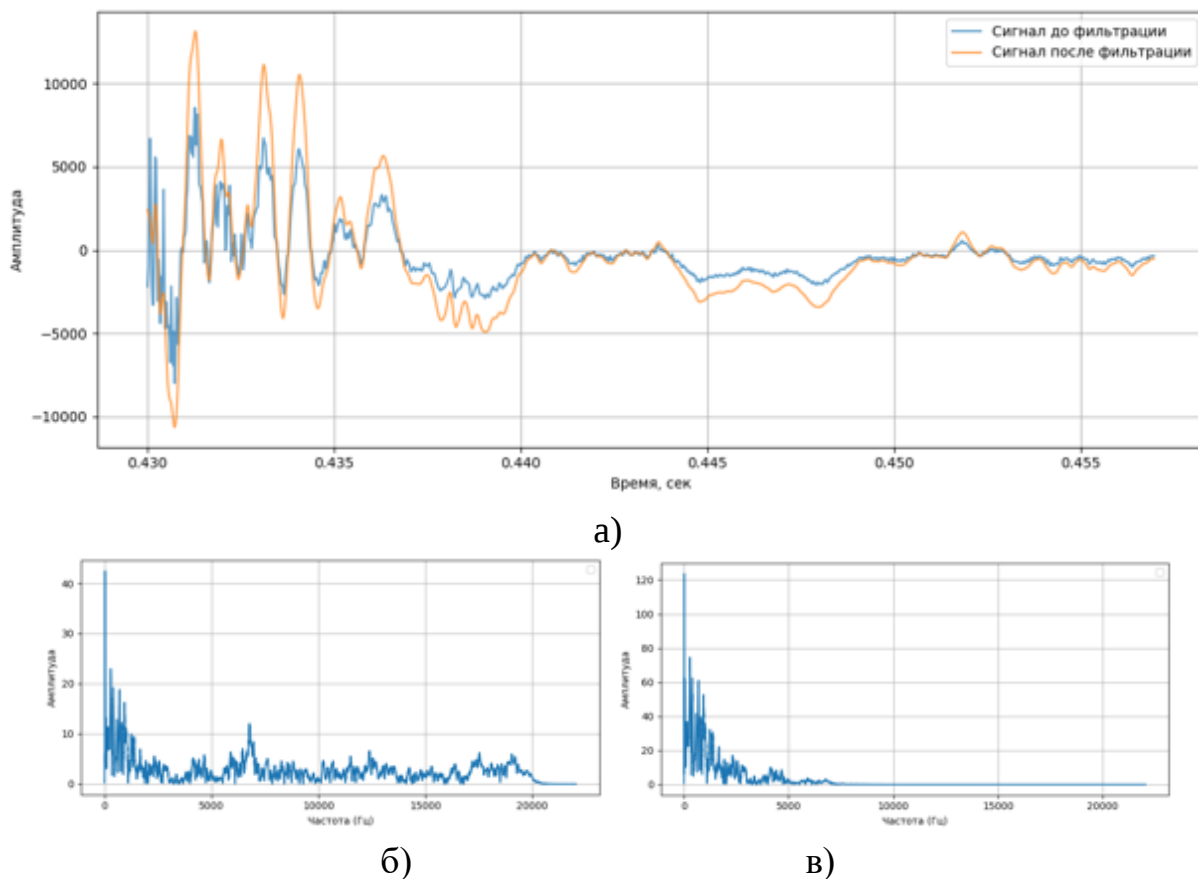


Рисунок 16 – акустический сигнал от полиэтилентерефталата в амплитудно-временной области: а) до и после фильтрации; б) спектр до фильтрации; в) спектр после фильтрации

Подобное искажение может быть связано с тем, что, подобно снижению амплитуд в прочих сигналах, в некоторых фильтр, особенно при двунаправленной фильтрации, выступает как усилитель для полезного сигнала [28]. Так как целью в настоящем исследовании является классификация сигналов относительно друг друга, в приоритете стоит сохранение различимости между сигналами, и усиление можно принять как один из вариантов нормы.

Основная энергия зарегистрированных акустических сигналов (информативных составляющих) локализована в области частот до 5000 Гц. Во всех графиках частотного спектра до 5000 Гц имеются изломанные участки некоторого резонансного пика. Это означает, что в данном участке завершается биение одного сигнала и начинается биение другого. Следовательно, в качестве верхней частоты среза для полосового фильтра выбрана частота, соответствующая этому участку.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) демонстрирует неизменную амплитуду при частотах от нуля до точки, несколько предшествующей 5 кГц, плавный спад на участке с около 5 кГц до 20 кГц, далее крутой спад.

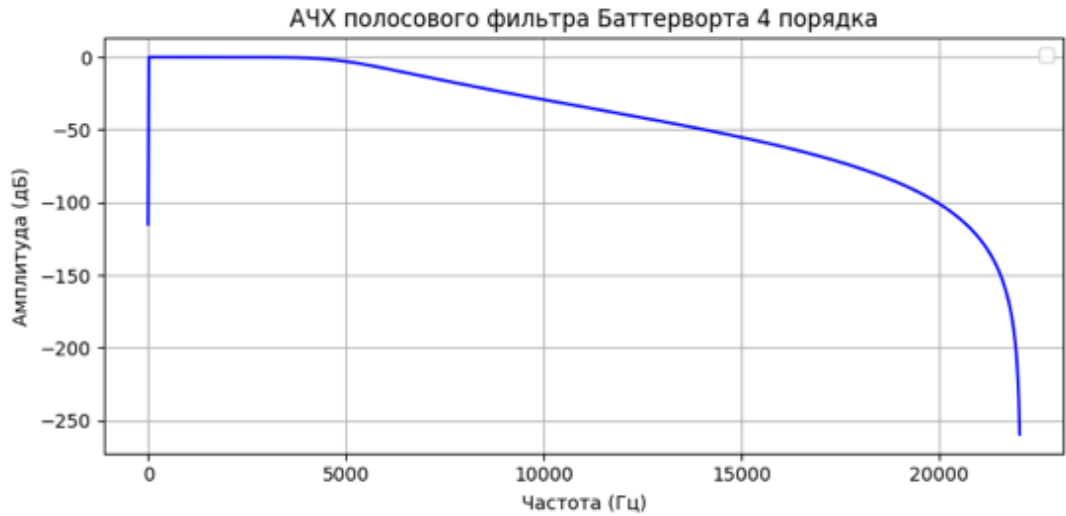


Рисунок 17 – график АЧХ фильтра Баттерворта с верхней частотой среза 5 кГц

В целях повышения качества обработки используется метод двунаправленной фильтрации: последовательное соединение двух систем II порядка [29]. В сравнении с полиномами Чебышева и Бесселя, полиномы Баттерворта наиболее результативно подавляют шум и вероятность завышения значения среднеквадратического отклонения [29].

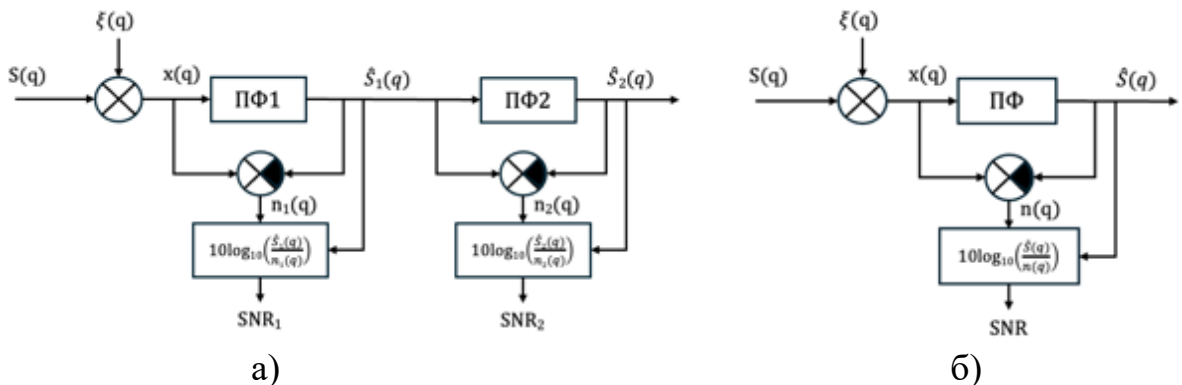


Рисунок 18 – структурные схемы вычисления ОСП при
а) двунаправленной фильтрации; б) однонаправленной фильтрации

На рисунке 16 представлены схемы вычисления отношения сигнал/шум для двунаправленной (а) и однонаправленной (б) обработок; согласно теории, несмотря на то что обе системы на представляют из себя фильтр IV порядка, каскадная фильтрация более эффективна [29]. ОСП может рассчитываться несколькими способами: вычислением отношения между энергией бита и спектральной плотностью мощности шума, вычисление отношения между среднеквадратическим значением сигнала и среднеквадратическим значением помех [30]. В данной работе применяется энергетическая оценка по RMS.

Преимущество предложенного способа перед однонаправленной обработкой подтверждается экспериментально через сравнение отношений сигнала к шуму [31].

Таблица 3 – Оценка отношения сигнал/помехи сигналов после обработки двунаправленным и однонаправленным фильтром

Акустические сигналы	Измерение	Каскад, дБ		Без каскада, дБ	Превосходство
		1-я послед.	2-я послед.		
Сигналы от дерева	1	8,01	21,35	7,58	2,81
	2	7,22	20,98	6,77	3,09
	3	7,30	21,64	6,92	3,12
Сигналы от стали	1	-3,27	9,05	-2,78	3,25
	2	-4,05	10,63	-3,68	2,88
	3	-4,55	10,80	-4,13	2,61
Сигналы от нержавеющей стали	1	2,53	13,18	2,16	6,10
	2	1,28	13,48	0,94	14,34
	3	0,55	12,88	0,24	53,66
Сигналы от поливинилхлорида	1	13,35	20,32	13,40	1,51
	2	13,41	21,01	13,54	1,55
	3	13,20	21,03	13,35	1,57
Сигналы от полиэтилен-терефталата	1	17,99	24,44	18,25	1,33
	2	17,68	23,58	18,13	1,30
	3	17,24	23,93	17,47	1,36
Сигналы от полиэтилена	1	1,95	15,14	1,44	10,51
	2	2,98	15,73	2,36	6,66
	3	2,91	15,66	2,36	6,63

Анализ через отношения сигнал/помеха выявил недостаток обработки сигнала посредством однонаправленной фильтрации перед каскадной – она не в состоянии отфильтровать шум некоторых материалов. Все сигналы в группе стали принимают отрицательные значения, что свидетельствует о большей зашумленности сигнала после обработки [31]. Параметр превосходства, рассчитывавшийся через деление ОСП второй последовательности на ОСП после однонаправленной фильтрации, ни разу не принял значение ниже нуля, что избыточно сообщает о фактическом превосходстве двунаправленной фильтрации в рамках настоящего исследования [29].

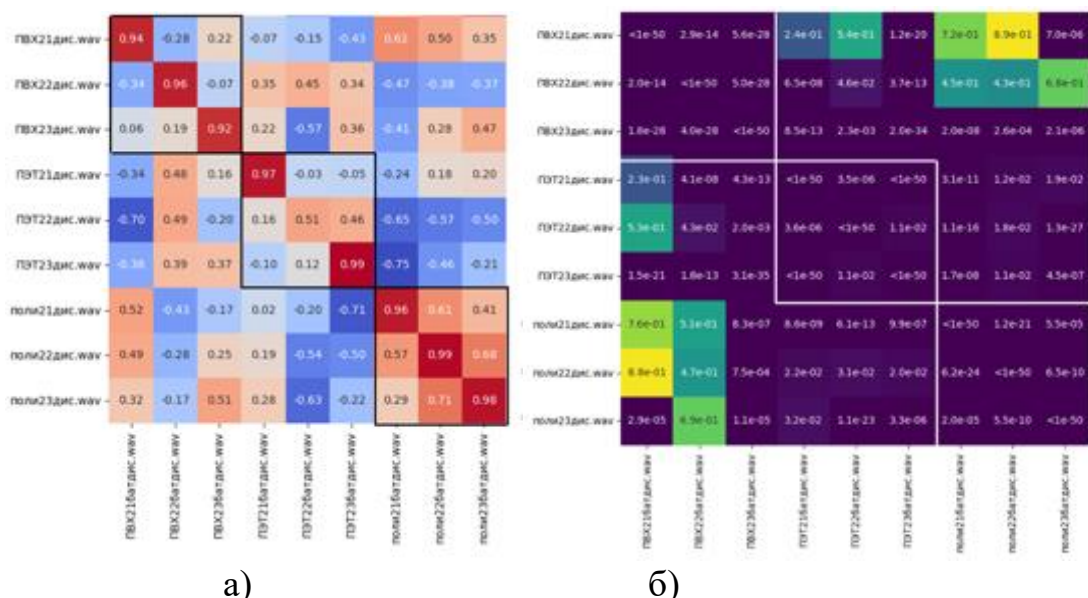


Рисунок 19 – Матрица оценки до и после реализации каскадной фильтрации акустического сигнала: а) матрица коэффициентов корреляции; б) p -value для корреляционной матрицы

Нулевая гипотеза гласит, что корреляционные связи, установленные корреляционные связи между сигналами случайны, а значит не могут применяться в сравнительном анализе эффективности двух видов фильтрации [32]. Альтернативной гипотезой, соответственно, является предположение о том, что связи между сигналами неслучайны и результаты выявления корреляционных связей допустимы к обоснованию результатов анализа [32]. Порог p -значимости устанавливаем 0.05 [32].

На рисунке приведены корреляционная матрица и p -value для корреляционной матрицы. Черными и белыми рамками соответственно выделены сигналы, принадлежащие одним группам: от поливинилхлорида в верхнем левом углу, от полиэтилентерефталата по центру, от полиэстера в нижнем правом углу. На диагональной прямой, проходящей через каждую раму, представлены пересечения зашумленных сигналов (ось X) с теми же сигналами, но прошедшими обработку каскадным фильтром IV порядка (ось Y). Переводом в проценты остатка от единицы устанавливаем уровень различимости между сигналами до и после фильтрации.

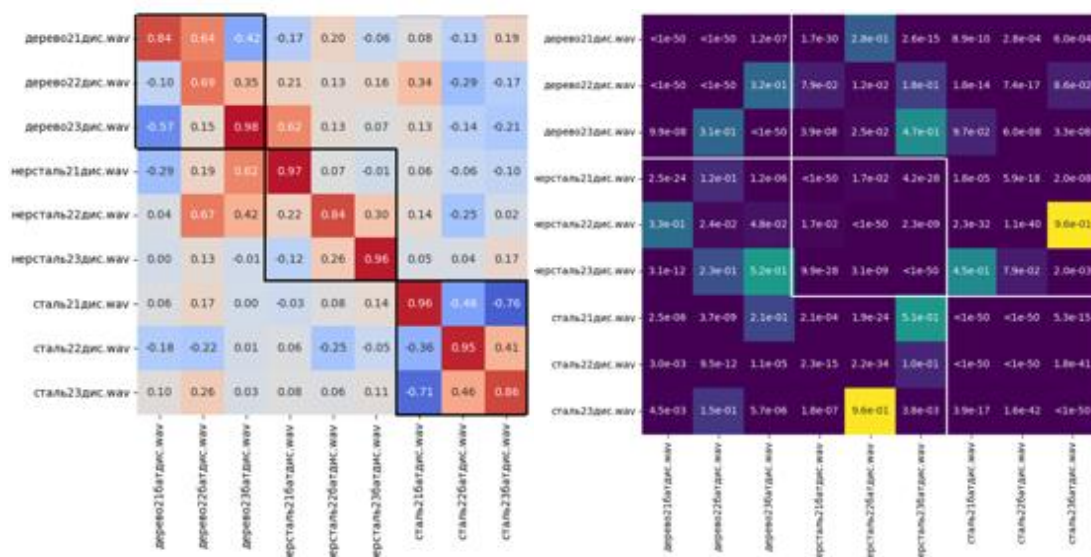


Рисунок 20 – (а) корреляционная матрица для сигналов до и после каскадной фильтрации от дерева, стали, нержавеющей стали, (б) p -value для корреляционной матрицы

Черными и белыми рамками соответственно выделены сигналы, принадлежащие одним группам: от дерева в верхнем левом углу, от нержавеющей стали по центру, от стали в нижнем правом углу. Примечательно, что, несмотря на малую выборку, p -значимость для всех сигналов, за исключением одного измерения в группе дерева, принимают значения ниже 0,05.

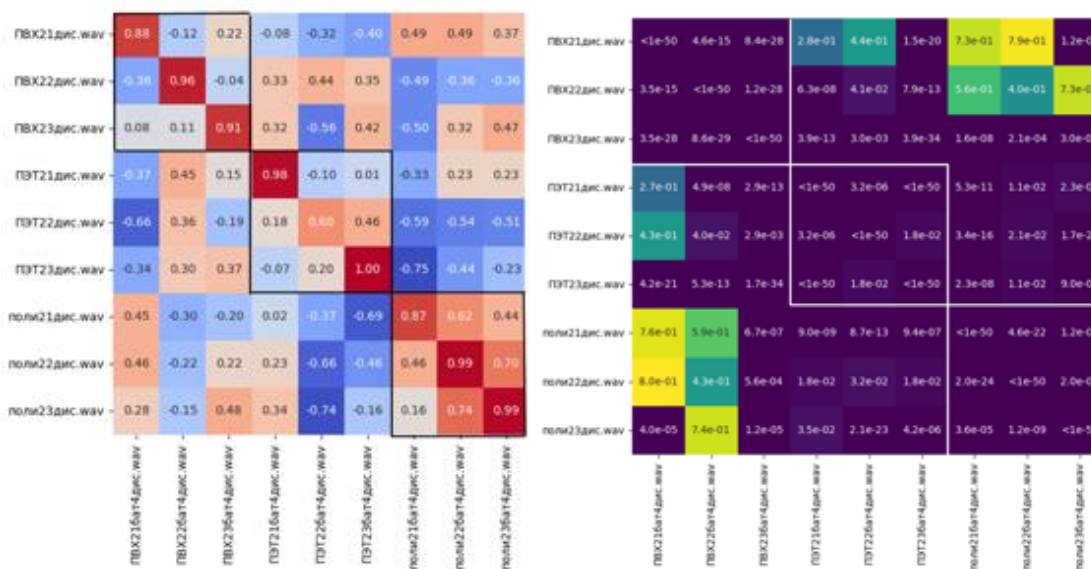


Рисунок 21 – а) корреляционная матрица для сигналов до и после однонаправленной фильтрации от ПВХ, ПЭТ, полиэтилена, (б) p -value для корреляционной матрицы

Канонично значения по диагонали равны нулю, так как в них сравниваются одни и те же данные, здесь же продемонстрирован фрагмент матрицы и по

диагонали сравниваются значения до и после фильтрации, из-за чего они обладают высокими и весьма высокими значениями корреляции, но не равны [33].

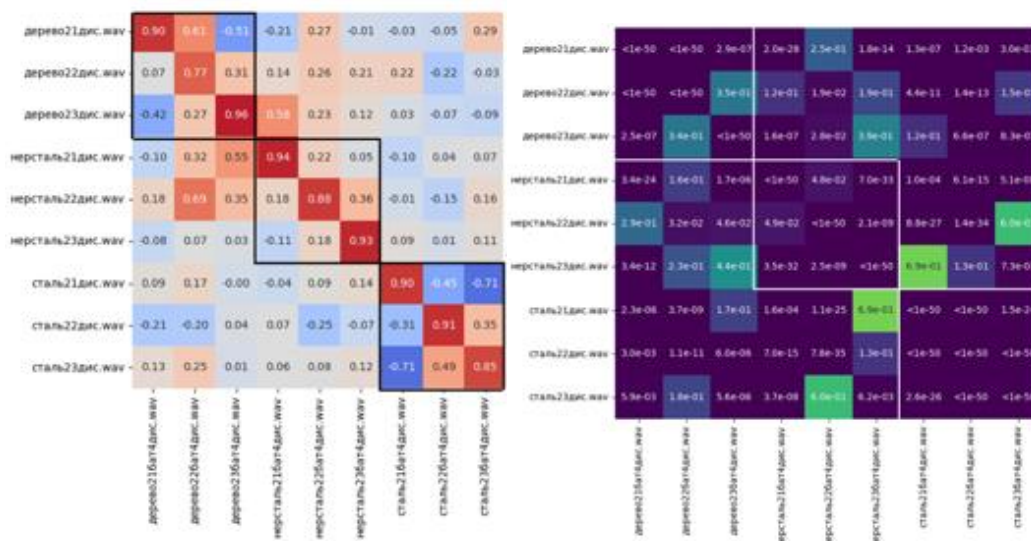


Рисунок 22 – а) корреляционная матрица для сигналов до и после однонаправленной фильтрации от дерева, стали, нержавеющей стали, (б) p -value для корреляционной матрицы

Большее отклонение от нуля при двунаправленной обработке также указывает на больший ее вклад в изменение формы сигнала [33]. Надлежит иметь в виду, что корреляционная матрица не указывает на эффективность фильтрации, а лишь на несхожесть между сигналом до и после фильтрации, о качестве фильтрации стоит судить из результатов вычисления ОСП [34]. Результаты вычисления уровня различимости каждого значения на центральной диагонали вынесены в таблицу.

Таблица 4 – Сравнение различимости сигналов до и после фильтрации двунаправленным и однонаправленным фильтрами.

$s(q)$ при $q = 16000$	Измерение	Уровень различимости в %		
		1-я послед.	2-я послед.	Без каскада
$s(q)$ от дерева	1	7	16	10
	2	10	31	23
	3	1	2	4
$s(q)$ от стали	1	2	4	10
	2	2	5	9
	3	9	14	15
$s(q)$ от нержавеющей стали	1	3	3	6
	2	11	16	12
	3	4	4	7
	1	2	6	12

$s(q)$ от поливинил-хлорида	2	4	4	4
	3	4	8	9
$s(q)$ от поли-этилентереф-талата	1	2	3	2
	2	22	49	40
	3	13	1	0
$s(q)$ от полиэтилена	1	2	4	13
	2	1	1	1
	3	1	2	1

Однонаправленный фильтр нестабилен, что показательно на примере полиэтилентерефталата: 40% несходства при втором измерении, и 0% несхожести при третьем. И хотя 40% – наивысший результат по столбцу, стоит отметить, что 0% – самый низкий по всей таблице, и эти два результата были получены из одной группы сигналов. Импульсы аномально высокой различимости не сопоставимы по эффективности со стабильным ее ростом при двунаправленной фильтрации, что подтверждает гипотезу о том, что каскадная фильтрация для настоящего исследования предпочтительна.

Как итог, двунаправленная фильтрация в данной системе не имеет явных недостатков, не только эффективнее избавляя сигналы от помех, но и в большей степени положительным образом влияя на измерение, чем однонаправленная обработка, поскольку значение p уровня значимости корреляционной связи не превышает установленный порог $p < 0.05$.

Выявленные результаты также подтверждаются выводами, сделанными в других исследованиях, посвященных двунаправленным системам фильтрации [47, 48].

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ МАТЕРИАЛОВ

В данной главе настоящей дипломной работы описывается алгоритм оценивания параметров отфильтрованных сигналов. Представляется детальный обзор метода измерения каждого параметра, а также классификация сигналов на основании проведенного анализа результатов измерений.

3.1 Алгоритм оценки параметров акустического сигнала

Самих сигналов недостаточно для полноценного анализа, ценность представляет информация, которую можно выявить благодаря их показателям или признакам. Оценка параметров акустического сигнала необходима для выявления информативных компонентов сигнала, которые служат входными данными для алгоритмов классификации. Алгоритм оценки параметров переводит сырые данные в компактные численные признаки, упрощающие классификацию исходных сигналов.



Рисунок 23 – алгоритм оценки параметров акустического сигнала

Основные группы признаков включают:

- 1) Временные, вычисляющиеся непосредственно во временной области сигнала;
- 2) Спектральные, получающиеся при преобразовании сигнала из исходной временной области в частотную;
- 3) Временно-частотные, вычисляющиеся с помощью вейвлет-преобразования, локализирующие сигнал одновременно по времени и частоте;
- 4) Кепстральные, анализирующие логарифм спектра и его обратное преобразование;
- 5) Статистические, основанные на статистике распределения значений сигнала, они также характеризуют форму распределения амплитуд;
- 6) Фрактальные, оценивающие сложность или самоподобие сигнала.

В алгоритме на рисунке 22 используются спектральные, временные и статистические признаки.

Быстрое преобразование Фурье применяется для выделения частотных компонентов фильтрованных сигналов, по его результатам оцениваются доминирующие частоты, спектральные полосы и распределение амплитуд по частотам. Это позволяет различать материалы по их характерным резонансам [35].

Среднеквадратическое значение амплитуды и пиковая амплитуда вычисляются непосредственно во временной области, они дают информацию об интенсивности звука, динамическом диапазоне акустического сигнала [35].

Также вычисляются коэффициенты асимметрии и эксцесса распределения. Асимметрия характеризует смещение распределения амплитуд, а эксцесс – высоту и остроту кривой распределения [35].

Мел-частотные кепстральные коэффициенты создают независимые от исходного сигнала, а соответственно и друг от друга вектора, что является одновременно их преимуществом и недостатком [36]. Они часто применяются в задачах идентификации и имитации речи, однако при анализе ударных или вибрационных сигналов от них не стоит ожидать существенной информации [36].

Фрактальные признаки чувствительны к небольшим различиям в формах сигнала, что бесполезно при анализе коротких ударных сигналов и небольшой выборке [37].

3.2 Оценка мощности

Термин «мощность сигнала» используется для описания сигнала и в действительности не определяет мощность в классическом смысле. Определение сигнальной мощности может применяться в контексте анализа любых сигналов $x(t)$, включая те, в которых отсчеты принимают комплексные значения [38].

Мощность сигнала является суммой квадратов абсолютных значений каждого цикла колебаний во временной области, деленую на длину сигнала, что

эквивалентно возведению среднеквадратического значения в квадрат. Данный метод является классическим способом вычисления мощности сигнала [38].

Формула для вычисления среднеквадратического значения при n величин принимает вид:

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{1}{n}(q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + \dots + q_n^2)} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n |q_i|^2} \quad (5)$$

Соответственно, формула для определения мощности дискретного сигнала [h]:

$$P = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2n+1} \sum_{i=-n}^n |q_i|^2 \quad (6)$$

Однако, на практике часто в обработке цифровых сигналов встречается упрощенная формула, представляющую из себя возведение отношения среднеквадратического значения в квадрат [39].

Таблица 5 – Сравнение результатов измерения мощностей

Измерение	$s(q)$ от дерева	$s(q)$ от стали	$s(q)$ от нержавеющей стали	$s(q)$ от ПВХ	$s(q)$ от ПЭТ	$s(q)$ от полиэтилена
1	0.001915	0.001315	0.001925	0.002564	0.005406	0.001799
2	0.001972	0.001294	0.001884	0.002594	0.005393	0.002039
3	0.002015	0.001281	0.001823	0.002574	0.004997	0.002700

Как видно из таблицы, значения мощностей от каждого типа материала, за исключением полиэтилена, сходятся. Это может быть связано с природой материала, и в этом случае данный метод оценки будет считаться непригодным для упомянутого класса материалов, или же с промахом при проведении исследования на уровне измерения сигналов. Примечательно то, что при оценке прочих широты полосы частот

Наивысшими уровнями мощности обладает полиэтилентерефталат со средней мощностью 0.005265. Так как в основе метода оценки лежит вычисление средней амплитуды цикла, повышенный уровень мощности свидетельствует о том, что при практически идентичных условиях регистрации ПЭТ имеет наиболее громкий звук. Также это сообщает об улучшении или же повышении отношения сигнала к шуму, так как мощный сигнал программно легче отделить от паразитных шумов. Теория уже подтвердилась в главе 2.3, таблице 3, где ПЭТ не только продемонстрировал средний ОСП при каскадной фильтрации после 2-го порядка 23.98, которого не удалось достичь при фильтрации сингалов от других материалов, но и разительно более высоким ОСП при однонаправленной фильтрации.

Величины мощностей сигналов от дерева, ПВХ и нержавеющей стали находятся в пределах от 0.001823 до 0.002594, ширина диапазона мощностей составляет лишь 0.000771, то есть, эти 3 группы дозволительно объединить в одну subgroupу.

Опираясь на проведенный анализ, была выполнена относительная классификация сигналов по мощности на:

- 1) Высокой мощности – значение в среднем превышает порог 0.0048;
- 2) Средней мощности – значение в среднем не выходит за пределы $0.0014 > x > 0.0048$;
- 3) Низкой мощности – значение в среднем не превышает порог 0.0014

Полиэтилен имеет сигналы с неоднородными уровнями мощности – в рамках рассматриваемой выборки невозможно отнести группу сигналов к прочему подклассу.

При исследовании данного параметра материала с неопределенным относительным уровнем мощности (полиэтилена) при условии наличия большего числа образцов вероятно причисление сигналов к одному из иных подклассов либо определение указанной категории как достоверной и объединяющей сигналы материалов с нелинейной динамикой.

Сталь и нержавеющая сталь, являясь единственными металлическими материалами в выборке, демонстрируют удивительно сильную различимость. Несмотря на то, что условно их можно отнести к одному подклассу, имеет смысл вынести сталь в отдельный, так как ее сигналы являются единственной группой, чьи ОСП при фильтрации без каскадов приняли отрицательное значение.

3.3 Оценка амплитуды

Оценка громкости сигнала требует понимания физических различий между цифровым и аналоговым потоком информации более прочих параметров, так как существует множество методов оценки амплитуды, результаты которых могут значительно отличаться друг от друга с точки зрения методологии и различимости информации [40]. Амплитуда по своей природе является аналоговой информацией, при аналогово-частотном преобразовании она оцифровывается, но все еще не является информацией, которую можно выразить в абсолютной величине [40]. Так, на графике во временной области, где амплитуда зависит от момента времени, первая рассчитывается относительно самой себя: громче на одном участке, в отличие от оставшихся.

Основой любого метода измерения амплитуды считается наложение аналогового сигнала на вектор отсчетов фиксированной длины [41]. В алгоритме, который применяется как один из инструментов исследования в данной работе, реализован расчет амплитуды в милливольтках. Алгоритм учитывает типовую архитектуру аналого-цифрового тракта, включая разрядность сигнала, составившей 16 бит, что переводится в 32767 уровней цифрового максимума. Параметр `full_scale_voltage_rms` в 1.4 В выбран на основе типичного уровня напряжения на выходе интерфейса при цифровом значении 0

dBFS, соответствующем +15 dBu, что документировано для устройств серии Scarlett [10].

Таблица 6 – Сравнение результатов измерения амплитуды.

Измерение	$s(q)$ от дерева, мВ	$s(q)$ от стали, мВ	$s(q)$ от нержавеющей стали, мВ	$s(q)$ от ПВХ, мВ	$s(q)$ от ПЭТ, мВ	$s(q)$ от полиэтилена, мВ
1	61.26	52.66	61.43	70.89	102.93	59.38
2	62.17	50.35	60.77	71.31	102.81	63.22
3	62.84	50.11	59.78	71.03	98.97	72.74

Здесь подтверждается приведенная в предыдущем подразделе гипотеза о том, что ассоциация между мощностью и ОСП сигналов связаны со значениями амплитуды. Амплитуда является одной из фундаментальных характеристик звуковых сигналов, в том числе акустических, и используется при вычислении среднеквадратического, который в свою очередь лежит в основе измерения мощности [30].

Сигнал от стали обладает самым низким значением, ПЭТ однозначно обладает высокоамплитудным стабильным сигналом, значением средней амплитуды, почти вдвое превышающим среднюю амплитуду низкоамплитудных сигналов. Полиэтилен по средней амплитуде можно сгруппировать с деревом и нержавеющей сталью, однако данный сигнал самый нестабильный.

Результаты вычисления соотносятся с результатами вычисления мощности, что было ожидаемо, так как метод вычисления мощности отсылается к средней амплитуде цикла. Опираясь на факт неодинаковости подходов к измерению данных параметров, есть основания делать вывод о том, что реализованный метод исчисления амплитуды является достоверным, однако в связи с недостаточной различимостью с оценкой мощности отбрасываю амплитуду как информативный параметр и не включаю его в классификацию.

3.4 Оценка частот

«Оценка частот» используется в контексте описания распределения энергетического содержания сигнала по частотам и на самом деле не сводится к измерению частоты в физическом смысле. По сей день самым популярным алгоритмом при обработке дискретных сигналов является быстрое преобразование Фурье [42]. для каждой частоты f спектральная плотность определяется как нормированная квадратная величина суммы вкладов всех временных отсчетов с учётом фазовых мультипликаторов [28].

Программно БПФ реализуется в Python через библиотеку NumPy. При необходимости данные нормализуются к диапазону от -1 до 1, чтобы избежать искажений при последующих вычислениях [43]. БПФ осуществляет переход от временной области к частотной [44], далее находятся нижняя и верхняя частоты, между которыми содержится 99% всей энергии [43]. Вычисление ширины полосы частот представляет из себя простое вычитание нижней границы из верхней [28].

Таблица 7 – Сравнение результатов измерения полос частот

Измерение	Δf сигнала от дерева, Гц	Δf сигнала от стали, Гц	Δf сигнала от нержавеющей стали, Гц	Δf сигнала от ПВХ, Гц	Δf сигнала от ПЭТ, Гц	Δf сигнала от полиэтилена, Гц
1	4312.22	4913.33	4878.89	4120.00	3212.22	4674.44
2	4367.78	4886.67	5087.78	4160.00	3407.78	4598.89
3	4317.78	4931.11	5022.22	4113.33	3203.33	4652.22

Относительно широкополосными сигналами без сомнений обладают сталь и нержавеющая сталь, у которых каждая ширина полосы частот не принимает значений ниже 4.8 кГц, соответственно, в качестве узкополосных сигналов классифицируем сигналы от полиэтилентерефталата, минимум устанавливаем максимум из группы.

Разброс частот у сигналов от дерева, полиэтилена и ПВХ достаточно широкий, здесь стоит установить границы между широкополосными и среднеполосными сигналами, хотя разница между данными группами не возрастает более 0.5 кГц. Верхняя граница сигналов от полиэтилена ближе к верхним границам широкополосных сигналов, чем иных у сигналов от дерева и ПВХ, значит минимумом для широкополосных сигналов определяем среднее значение ширины полос частот сигналов от полиэтилена.

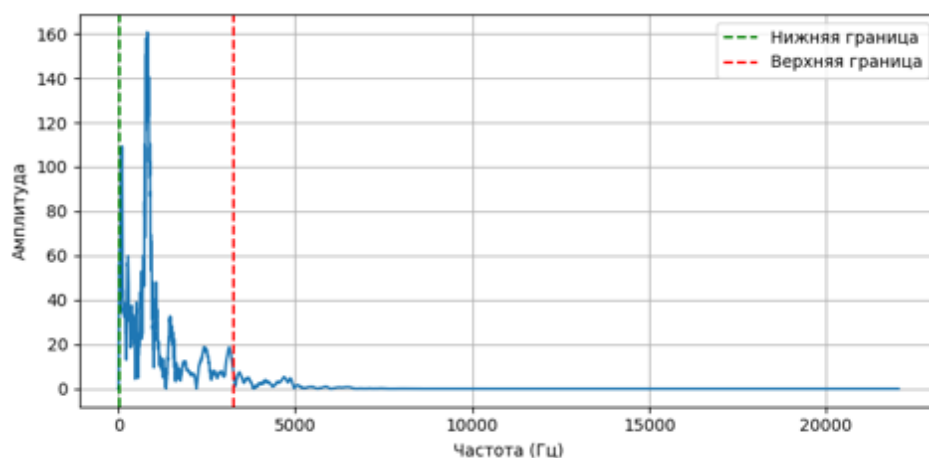


Рисунок 24 – амплитудно-частотная характеристика сигнала от ПЭТ

Из графиков сигналов в частотной области видно, что верхняя граница смещается в сторону более высоких частот с увеличением числа пиков. Поскольку метод оценки опирается на энергию сигнала, имеет место предположение о том, что расширение частотной полосы связано с повышением значения амплитуд [28]. Исходя из этого, можно заключить, что амплитуда косвенно или напрямую является фундаментом для многих параметров акустических сигналов.

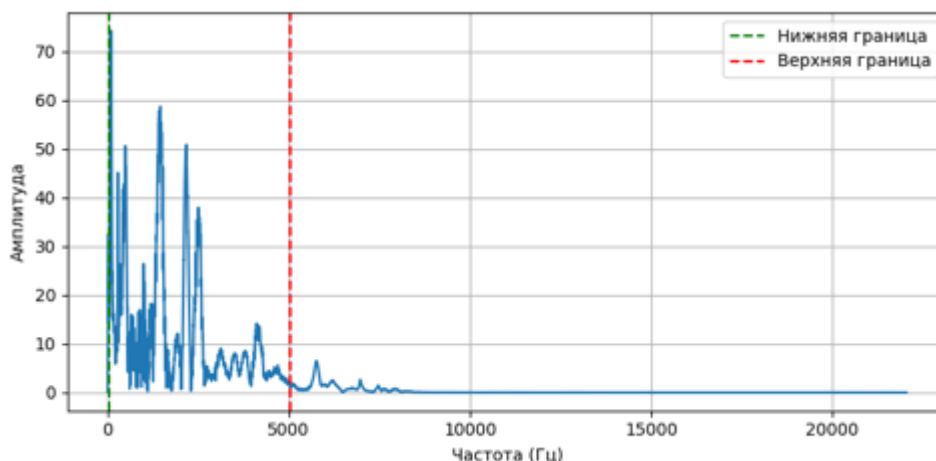


Рисунок 25 – амплитудно-частотная характеристика сигнала от нержавеющей стали

Наиболее нестабильными являются сигналы от ПВХ, разница между наибольшим и наименьшим значениями составляет 2156,57 Гц; опираясь на среднее значение сигналов (16326.34), их и сигналы от дерева, стали и полиэтилена можно отнести к одному классу, так как, несмотря на большой разброс, ширина полос сигналов от ПВХ не касается границ полос частот сигналов от ПЭТ, и подходит близко к верхней границе полосы частот сигнала от нержавеющей стали

Основываясь на проведенном анализе, измеренные данные были поделены на три класса:

- 1) Широкополосные – ширина полосы частот превышает 4.6 кГц;
- 2) Среднеполосные – ширина полосы частот находится в границах 3.5 кГц < Δf < 4.6 кГц;
- 3) Узкополосные – ширина полосы частот превышает 3.5 кГц.

3.4 Оценка распределения

Из всего многообразия параметров, по которым оценивается распределение, останавливаясь на асимметрии и эксцессе, так как с их помощью возможно получить достаточно информативное представление о ключевых особенностях формы распределения, чтобы определить, является ли оно нормальным [46].

Результаты, равные нулям при каждом показателе, сообщают о нормальности распределения и отсутствии хвостов [45].

Асимметрия представляет из себя отношение центрального момента третьего порядка и среднеквадратического отклонения, возведенного в куб, [46]. Исчисляется по формуле:

$$A_s = \mu_3 / \sigma^3 \quad (7)$$

Знаковость асимметрии указывает, где находятся данные – их скошенности в ту или иную сторону. При положительной скошенности хвост протянут с правой стороны от математического ожидания; при отрицательной скошенности хвост протянут с левой стороны от математического ожидания [45].

Экссесс описывает остроту пика, тем самым давая представление и о тяжести хвоста, определяется как четвертый центральный момент, деленный на двойной квадрат среднеквадратического отклонения [46]:

$$E_k = \left(\frac{\mu_4}{\sigma^4} \right) - 3 \quad (8)$$

Положительное значение эксцесса говорит о степени остроты и высоты пика распределения, в то время как отрицательный эксцесс сообщает о том, что сравниваемая кривая обладает уплощенной и относительно низкой вершиной.

Таблица 8 – Сравнение результатов вычисления асимметрии и эксцесса

Результат вычисления скошенности A_s						
Измерение	$s(q)$ от дерева	$s(q)$ от стали	$s(q)$ от нержавеющей стали	$s(q)$ от ПВХ	$s(q)$ от ПЭТ	$s(q)$ от полиэтилена
1	4,48	1,79	1,35	-1,32	0,48	2,79
2	1,77	2,42	0,74	-2,48	1,20	3,26
3	1,59	2,23	1,16	-1,61	1,56	0,72
Результаты вычисления куртозиса E_k						
Измерение	$s(q)$ от дерева	$s(q)$ от стали	$s(q)$ от нержавеющей стали	$s(q)$ от ПВХ	$s(q)$ от ПЭТ	$s(q)$ от полиэтилена
1	303,16	246,83	239,09	179,50	115,79	171,26
2	293,35	271,93	218,73	179,63	120,75	145,85
3	283,39	267,25	221,93	174,89	130,85	128,66

Ни одно из измерений не приняло нулевых значений, однако это является вариантом нормы, поэтому параметр не отбрасываю классификация результатов будет проводиться относительно друг друга.

Относительно асимметрии сигналы имеют ненормальные, но равномерные распределения, однако каждый сигнал принял экстремальное значение по эксцессу. Вероятней всего это происходит из-за импульсной природы измерения сигналов. Когда шток ударяет по образцу, большая часть отсчетов – это тишина или шум, то есть, значения, близкие к нулю, и когда начинается полезный сигнал, амплитуды вскакивают до локально аномальных значений [46]. Короткие мощные всплески пиков воспринимаются системой как избыток, соответственно, пиковая фаза очень короткая, средняя форма остается практически нулевой, а полезный сигнал считается алгоритмом вычисления эксцесса как аномалия [46].

Таблица 9 – Возможные классы по распределению

	$E > 200$	$E < 200$
Отрицательная асимметрия	Тяжелохвостый левосторонний	Тонкохвостый левосторонний
Положительная асимметрия	Тяжелохвостый правосторонний	Тонкохвостый правосторонний

Асимметрия и эксцесс несут информацию о форме сигнала и равномерности или неравномерности распределения полувольт на области. При попадании пика с наивысшей амплитудой на положительную область, что наблюдается у большинства сигналов, асимметрия принимает положительное значение.

Ни у результатов вычисления эксцесса, ни у результатов вычисления асимметрии нет пересечений и неясностей, группа с отрицательными значениями имеет однозначно левостороннее скошенности, так и значения эксцесса однозначно больше или меньше 200. В связи с этим, для классификации по распределению представляется возможным разделить сигналы на четыре группы. Однако, так как среди представленной выборки нет тяжелохвостого сигнала с отрицательной асимметрией, данный класс не будет включен в классификацию, но стоит помнить, что формально их количество может увеличиться как минимум до четырех при увеличении числа исследуемых материалов.

ГЛАВА 4. КЛАССИФИКАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ МАТЕРИАЛОВ

В последней главе настоящего исследования представлены результаты классификации сигналов от материалов, выделенных с помощью акустического метода. Сделан вывод о различимости сигналов от материалов.

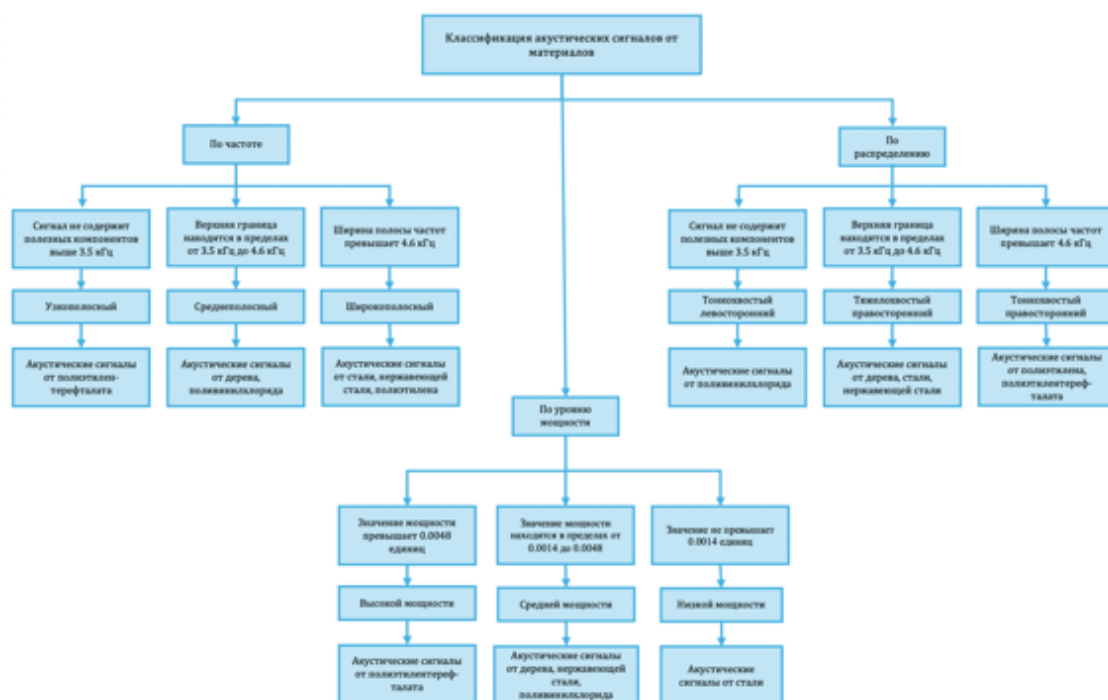


Рисунок 26 – схема классификации акустических сигналов от материалов

Результат анализа приведенной схемы классификации, представленной на рисунке 26, позволяет выделить следующие выявленные особенности акустических сигналов от материалов:

- 1) Акустический сигнал от дерева обладает средней шириной полосы частот, тяжелым хвостом, положительной асимметрией и средним уровнем мощности, которые являются характерными для всех трех измерений, рассматриваемой группы сигналов;
- 2) Акустический сигнал от стали обладает широкой полосой частот, тяжелым хвостом, положительной асимметрией и низким уровнем мощности, которые являются характерными для всех трех измерений, рассматриваемой группы сигналов;
- 3) Акустический сигнал от нержавеющей стали обладает широкой полосой частот, тяжелым хвостом, положительной асимметрией и средним уровнем мощности, которые являются характерными для всех трех измерений, рассматриваемой группы сигналов;
- 4) Акустический сигнал от поливинилхлорида обладает средней шириной полосы частот, тонким хвостом, отрицательной асимметрией и средним

уровнем мощности, которые являются характерными для всех трех измерений, рассматриваемой группы сигналов;

- 5) Акустический сигнал от полиэтилентерефталата обладает узкой шириной полосы частот, тонким хвостом, положительной асимметрией и высоким уровнем мощности, которые являются характерными для всех трех измерений, рассматриваемой группы сигналов;
- 6) Акустический сигнал от полиэтилена обладает широкой полосой частот, тонким хвостом, положительной асимметрией и неоднородными уровнями мощности, которые являются характерными для всех трех измерений, рассматриваемой группы сигналов;

Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что выделенные особенности зарегистрированных и обработанных акустических сигналов являются уникальными для каждой из шести групп сигналов от материалов, что может охарактеризовать акустические свойства проанализированных материалов, которые широко встречаются в бытовой и строительной областях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как итог была доказана различимость материалов по акустическим параметрам, что означает, что разработанный метод и входящие в него алгоритмы возможно исследовать углубленно и рассмотреть возможность его применения наравне с существующими методами классификации материалов и объектов. При увеличении выборки, как числа анализируемых материалов, так и числа измерений, возможно расширение границ, определяющих подкласс, однако вероятность полного совпадения подклассов становится менее возможной, так как даже на уровне восемнадцати измерений по трем материалам не демонстрирует пересечений по всем подклассам.

Камера физически реализуемого макета собрана из поливинилхлорида, система регистрации сигналов собрана с применением внешней звуковой карты, измерительного микрофона в качестве датчика, микроконтроллера, управляющего МОП-транзистора и соленоидом с возвратной пружиной в качестве исполнительного механизма.

Был реализован дискретный полосовой двунаправленный фильтр Баттерворта IV порядка. С помощью оценки отношения сигнал/помеха, анализа корреляционных связей между сигналами до и после фильтрации каскадным и однонаправленным фильтрами, было выявлено, что двунаправленный фильтр обладает превосходящими характеристиками, он был применен для дальнейшего анализа сигналов.

Алгоритм извлечения признаков состоит из оценки таких параметров как ширина полосы частот, уровня мощности, асимметрии и эксцесса. Данный набор параметров достаточен для определения различных признаков сигнала от материала.

Рассматривается перспектива реализации адаптивного фильтра в дальнейших исследованиях, продолжающих настоящее, так как для некоторых групп выбранный фильтр не является в достаточной мере эффективным, а также рассмотрение возможности замены параметров, опирающихся на расчет амплитуды, на значения амплитуды.

На сегодняшний день для классификации и сортировки материалов применяются либо методы, основанные на физико-химических свойствах материалов, либо системы на основе искусственного интеллекта, определяющие тип материала с помощью компьютерного зрения. Первые применимы только к специфическим объектам, вторые на практике редко используются, ввиду сложности реализации подобной системы. Акустический метод может занять пустующую промежуточную позицию между традиционными и высокотехнологичными методами быстрой классификации объектов и материалов, так как анализ и введение данных в систему требует времени на несколько меньше, чем обучение модели, а также способен совмещать классификацию материалов, не обладающих достаточно сходящимися физическими параметрами для эффективного внедрения одного из механических и физико-химических методов.

Перечень принятых сокращений, терминов

- АЧХ – амплитудно-частотная характеристика.
БПФ – быстрое преобразование Фурье.
МОП – металл-оксид-полупроводник.
ОСП – отношение сигнал/помеха.
ПВХ – поливинилхлорид.
ПЭТ – полиэтилентерефталат.
ФЧХ – фазочастотная характеристика.
MFCC – Mel-frequency cepstral coefficients, мел-частотные кепстральные коэффициенты.
RMS – root mean square, среднеквадратическое значение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Красильников, В. А. Введение в физическую акустику [Текст]: учебное пособие / В. А. Красильников, В. В. Крылов, 1984. – 400 с.

[http://www.imash.ru/netcat_files/file/BIBLIO/FIZIKA/Красильников%20В_А_.%20Крылов%20В_В_%20-%20Введение%20в%20физическую%20акустику%20-%201984%20\(1\).pdf](http://www.imash.ru/netcat_files/file/BIBLIO/FIZIKA/Красильников%20В_А_.%20Крылов%20В_В_%20-%20Введение%20в%20физическую%20акустику%20-%201984%20(1).pdf)

[2] Калихман, А. Д. Строительная физика: проектирование и расчеты: в 3 ч. Ч. 3: Акустика и защита зданий от шума / А. Д. Калихман. — Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2012. — 160 с.

<https://www.twirpx.com/file/1020370/>

[3] 6 Types of Sorting Systems for Industrial Management

<https://www.anis-trend.com/6-types-of-sorting-systems/>

[4] Самойлов, А. Г. Основы акустики и электроакустики [Текст]: учебное пособие / А. Г. Самойлов, С. А. Самойлов. — Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. — 56 с.

<https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/1140/3/00541.pdf>

[5] Акустические методы испытаний материалов и конструкций

<https://stroit.ru/stati/akusticheskie-metody-ispytaniy-materialov-i-konstruktsiy/>

[6] The history of ribbon microphones and artifacts from the Shure archives

<https://www.shure.com/en-US/insights/the-history-of-ribbon-microphones-and-artifacts-from-the-shure-archives>

[7] Куликов, С. В. Что должен знать журналист о микрофонах: учебно-методическое пособие / С. В. Куликов. — М. : РУДН, 2013. — 38 с.

<https://www.twirpx.com/file/3658615/>

[8] Measurement Condenser Microphone ECM8000 Technical Specifications

https://mediadl.musictribe.com/media/sys_master/h47/hde/8849927929886.pdf

[9] Зачем нужны внешние звуковые карты и что в них особенного

https://club.dns-shop.ru/blog/t-160-zvukovyye-kartyi/28244-zachem-nujnyi-vneshnie-zvukovyye-kartyi-i-chto-v-nih-osobennogo/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F

[10] Scarlett 2i2 Specifications

<https://userguides.focusrite.com/hc/en-gb/articles/19640392541202-Scarlett-2i2-Specifications>

[11] Эверест, Ф. А, The Master Handbook Acoustics [Текст] / Ф. А. Эверест. — Нью-Йорк: McGraw-Hill, 2001. — 599 с.

https://psv4.userapi.com/s/v1/d/DmA5xBIvSVxXgfbWhlZHPnX8ReuH9gCR3fYVbkKmp6HtDxFYVr0uAXPTiBEgujeiJWYfvwhg80ncT3g4bG0Cp0syHfhuT1Iqv6zg0k2LCN3sWC-o/The_Master_Handbook_Of_Acoustics.pdf

[12] PySerial Documentation

<https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/>

[13] Козырев, С. К. Электрический привод. Термины и определения / С. К. Козырев, А. С. Анучин, А. Е. Козярук [и др.] ; под ред. С. К. Козырева. — М. : Изд-во МЭИ, 2015. — 96 с.

https://elprivod.nmu.org.ua/files/automaticED/kozyrev_s_k_anuchin_a_s_kozyaruk_a_e_i_dr_elektricheskii_pri.pdf

[14] Ландсберг, Г. С. Элементарный учебник физики / под ред. Г. С. Ландсберга – М.: Физматлит, 2023. – 488 с.

<https://www.twirpx.com/file/4180498/>

[15] Лагутин, Б. М. Электростатика. Постоянный ток. Магнетизм : метод. указания / Б. М. Лагутин, В. Ф. Демехин, А. Г. Кочур, Н. Б. Шевченко. — Ростов н/Д : Рост. гос. ун-т путей сообщения, 2011. — 108 с.

<https://www.twirpx.com/file/1450640/grant/>

[16] IRLZ44N datasheet

<https://www.alldatasheet.com/html-pdf/68872/IRF/IRLZ44N/46/1/IRLZ44N.html>

[17] IRL2203NPBF

<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/194541/IRF/IRL2203NPBF.html>

[18] IRL3705NPBF

<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1409655/INFINEON/IRL3705NPBF.html>

[19] IRLB3034PBF

<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/340846/IRF/IRLB3034PBF.html>

[20] Источник бесперебойного питания

https://ru.everexceed.com/blog/the-working-principle-of-anti-reverse-diode_b436

[21] How To Soundproof: Acoustic Foam Does Not Block Sound
<https://acousticalsolutions.com/how-to-soundproof-acoustic-foam-does-not-block-sound/?srsltid=AfmBOooMbe8OA6-cl2v5lrJXkgdmsexg5jOMJT0Nt3iSaxBzjnHCqlIF>

[22] How Bass Traps Work

<https://gikacoustics.net/how-bass-traps-work/>

[23] The Top 10 Soundproofing Myths, Busted

<https://www.musiccityacoustics.com/our-blog/ten-soundproofing-myths-busted>

[24] Тронин, Ю. В. Синтез фильтров : учеб. пособие / Ю. В. Тронин, О. В. Гурский. — М. : Изд-во МАИ, 1990. — 76 с.

<https://www.twirpx.com/file/426026/>

[25] Брюханов, Ю. А Цифровые фильтры: учеб. пособие / Ю. А. Брюханов, Приоров. — Ярославль : Яросл. гос. ун-т, 2002. — 288 с.

<http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20020461.pdf>

[26] Проакис, Дж. Digital Signal Processing : учебное пособие / Дж. Проакис,, Д. Г. Манолакис. — Essex: Pearson Education Limited 2014. — 1014 с.

[27] Христофоров, А. В. Методы анализа спектра сигнала : учеб.-метод. пособие / А. В. Христофоров. — Казань : Казан. гос. ун-т, физ. фак., 2004. — 21 с.

<https://kpfu.ru/docs/F1648752926/METODY.ANALIZA.SPEKTRA.SIGNALA.pdf>

[28] Оппенхайм, А. В. Discrete-Time Signal Processing / Оппенхайм А. В., Шафер Р. — изд. 3-е – Upper Saddle River: Pearson, 2010. — 1091 с.

<https://file.fouladi.ir/courses/dsp/books/%28Prentice-Hall%20Signal%20Processing%20Series%29%20Alan%20V.%20Oppenheim%2C%20>

[20Ronald%20W.%20Schafer-Discrete-Time%20Signal%20Processing-Prentice%20Hall%20%282009%29.pdf](#)

[29] Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А., Кузиванов Д. О. Оценка эффективности методов обработки сигналов акустической эмиссии при реализации полиномиальных фильтров // Омский научный вестник. – 2022. – № 3 (183). – С. 45–52.

<https://journals.omgtu.ru/index.php/onv/article/view/634/616>

[30] Скляр, Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение [Текст] / Б. Скляр; пер. с англ. – 2-е изд., испр. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2007. – 1104 с.

https://books.4nmv.ru/books/tsifrovaya_svyaz_teoreticheskie_osnovy_i_prakticheskoe_primenenie_2-e_izdanie_3643708.pdf

[31] Бишоп, О. Электронные схемы и системы [Текст] / О. Бишоп; пер. с англ. к. т. н. А. Н. Рабодзей. – М. : ДМК Пресс, 2016. – 576 с.

<https://books.google.ru/books?id=d8BSEAAAQBAJ&pg=PA370#v=onepage&q&f=false>

[32] Hypothesis Testing (P-value Approach)

<https://online.stat.psu.edu/statprogram/reviews/statistical-concepts/hypothesis-testing/p-value-approach>

[33] Коэффициент корреляции Пирсона

https://kpfu.ru/portal/docs/F_2064674290/NPS_19.Pirson.Menshov.pdf

[34] Продеус, А. Н. Оценивание априорного отношения сигнал/шум в системах шумоподавления [Текст] / А. Н. Продеус, В. С. Дидковский. – Киев : Национальный технический университет Украины «КПИ», 2015. – 6 с.

https://www.researchgate.net/publication/285597543_Ocenivanie_apriornogo_otnose_nia_signal-sum_v_sistemah_sumopodavlenia

[35] Features of Changes in the Parameters of Acoustic Signals Characteristics of Various Metalworking Processes and Prospects for Their Use in Monitoring

<https://www.mdpi.com/2076-3417/14/1/367>

[36] Иванов И. И. Анализ метода мел частотных кепстральных коэффициентов применительно к процедуре голосовой аутентификации – 9 с.

<https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metoda-mel-chastotnyh-kepstralnyh-koeffitsientov-primenitelno-k-protsedure-golosovoy-autentifikatsii/viewer>

[37] Fractal Dimensions: What are they? How can they be used for Feature Extraction?

<https://utkarsh-lal.medium.com/fractal-dimensions-what-are-they-how-can-they-be-used-for-feature-extraction-86301d3c42ab>

[38] Signal Energy and Power

<https://www.matel.p.lodz.pl/wee/i12zet/Signal%20energy%20and%20power.pdf>

[39] Measure the Power of Signal

<https://www.mathworks.com/help/signal/ug/measure-the-power-of-a-signal.html>

[40] Digital audio concepts

https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Media/Guides/Formats/Audio_concepts?utm_source=chatgpt.com

[41] Пукетт, М. The Theory and Technique of Electronic Music / М. Пукетт. — Сан-Диего : University of California, 2003. — 220 с.

[42] Малоземов, В. Н. Параметрические варианты быстрого преобразования Фурье/ В. Н. Малоземов, О. В. Просеков.

https://dha.spb.ru/PDF/1_paramFFT.pdf

[43] Маккини, У. Python и анализ данных: Первичная обработка данных с применением pandas, numpy и Jupyter / У. Маккини пер. с англ. А. А. Слинкина. — 3-е изд. — М.: МК Пресс, 2023. — 536 с.

<http://flibustaongezhld6dibs2dps6vm4nvqg2kp7vgowbu76tzopgnhazqd.onion/b/712864>

[44] Рабинер, Л. Р. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Р. Рабинер, Б. Голд: пер. с англ. — М. : Мир, 1978— 835 с.

http://optic.cs.nstu.ru/files/Lit/Math/Rabiner_Gold.pdf

[45] Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов / В. Е. Гмурман. — 9-е изд., стер. — М.: Высш. шк., 2003. — 479 с.

http://univer.nuczu.edu.ua/tmp_metod/142/Gmurman.pdf

[46] Тарновская, Л. И. Статистика: учебное пособие / сост. Л. И. Тарновская — Томск: изд-во ТПУ, 2008. — 248 с.

https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KENT/students/statistic/Tab2/uch_1.pdf

[47] Altay Y. A., Kremlev A. S. Noise resistance processing of speech signals //2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). — IEEE, 2018. — P. 1180-1185.

https://www.researchgate.net/publication/323860786_Noise_resistance_processing_of_speech_signals

[48] Алтай Е. А., Кремлев А. С. Оценка точности обработки электрокардиосигнала методом каскадной широкополосной режекторной фильтрации // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. — 2020. — №. 2. — С. 18-28.

http://vestnik-rosnou.ru/sites/default/files/18_3.pdf

Приложение А

```
import serial
import sounddevice as sd
import numpy as np
import wave
import os
from datetime import datetime

Serial_port = '/dev/tty.usbserial-210'
BaudRate = 9600
SampleRate = 44100
Duration = 0.9
folder = 'SampleAudiau'

if not os.path.exists(folder):
    os.makedirs(folder)

def record_audio():
    current_time = datetime.now().strftime("%Y-%m-%d_%H-%M-%S")
    filename = f"rec_{current_time}.wav"
    file_path = os.path.join(folder, filename)

    print("Recording...")
    audio_data = sd.rec(int(SampleRate * Duration), samplerate=SampleRate,
channels=1, dtype='float32')
    sd.wait()
    print("Finished recording.")

    audio_data = audio_data[:, 0]

    audio_data = audio_data / np.max(np.abs(audio_data))
    audio_int16 = np.int16(audio_data * 32767)

    with wave.open(file_path, 'wb') as wf:
        wf.setnchannels(1)
        wf.setsampwidth(2)
        wf.setframerate(SampleRate)
        wf.writeframes(audio_int16.tobytes())

    print(f"Saved: {file_path}")

with serial.Serial(Serial_port, BaudRate, timeout=1) as ser:
    print("Waiting for signal from Arduino...")
```

```
while True:
    line = ser.readline().decode('utf-8').strip()
    if line == 'START':
        print("Signal received! Starting recording...")
        record_audio()
```

Приложение Б

```
import serial
import sounddevice as sd
import numpy as np
import wave
import os
from datetime import datetime

Serial_port = '/dev/tty.usbserial-210'
BaudRate = 9600
SampleRate = 44100
Duration = 0.9
folder = 'SampleAudiau'

if not os.path.exists(folder):
    os.makedirs(folder)

def record_audio():
    current_time = datetime.now().strftime("%Y-%m-%d_%H-%M-%S")
    filename = f"rec_{current_time}.wav"
    file_path = os.path.join(folder, filename)

    print("Recording...")
    audio_data = sd.rec(int(SampleRate * Duration), samplerate=SampleRate,
channels=1, dtype='float32')
    sd.wait()
    print("Finished recording.")

    audio_data = audio_data[:, 0]

    audio_data = audio_data / np.max(np.abs(audio_data))
    audio_int16 = np.int16(audio_data * 32767)

    with wave.open(file_path, 'wb') as wf:
        wf.setnchannels(1)
        wf.setsampwidth(2)
        wf.setframerate(SampleRate)
        wf.writeframes(audio_int16.tobytes())

    print(f"Saved: {file_path}")

with serial.Serial(Serial_port, BaudRate, timeout=1) as ser:
    print("Waiting for signal from Arduino...")
```

```
while True:
    line = ser.readline().decode('utf-8').strip()
    if line == 'START':
        print("Signal received! Starting recording...")
        record_audio()
```

Приложение В

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.io import wavfile
from scipy.signal import butter, filtfilt
from scipy.fft import fft, fftfreq
import os

LOWCUT = 10.0
HIGH CUT = 5000.0
ORDER = 2

input_path = "/path/to/file/ "
sample_rate, data = wavfile.read(input_path)

if data.dtype != np.float32 and data.dtype != np.float64:
    data = data / np.iinfo(data.dtype).max
if data.ndim > 1:
    data = data[:, 0]

def butter_bandpass(lowcut, highcut, fs, order):
    nyq = 0.5 * fs
    low = lowcut / nyq
    high = highcut / nyq
    return butter(order, [low, high], btype='band')

def apply_filter(signal, order):
    b, a = butter_bandpass(LOWCUT, HIGH CUT, sample_rate, order)
    return filtfilt(b, a, signal)

filtered_2nd = apply_filter(data, ORDER)
filtered_4th = apply_filter(filtered_2nd, ORDER)

output_dir = "/Users/darinakuanysch/Documents/PythonProject1/ButterAudiau2"
base_filename = os.path.basename(input_path)
name, ext = os.path.splitext(base_filename)
output_filename = f"{name}_бат{ext}"
output_path = os.path.join(output_dir, output_filename)

filtered_int16 = np.int16(filtered_4th / np.max(np.abs(filtered_4th)) * 32767)
wavfile.write(output_path, sample_rate, filtered_int16)
print(f"Файл сохранён: {output_path}")
```

Приложение Г

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.io import wavfile
from scipy.signal import butter, filtfilt
import os

LOWCUT = 10.0
HIGH CUT = 5000.0
ORDER = 4

input_path = "/path/to/file/ "
output_dir = "/path/to/other/file/ "

sample_rate, data = wavfile.read(input_path)

if data.dtype != np.float32 and data.dtype != np.float64:
    data = data / np.iinfo(data.dtype).max
if data.ndim > 1:
    data = data[:, 0]

def butter_bandpass_filter(signal, lowcut, highcut, fs, order):
    nyq = 0.5 * fs
    low = lowcut / nyq
    high = highcut / nyq
    b, a = butter(order, [low, high], btype='band')
    return filtfilt(b, a, signal)

filtered = butter_bandpass_filter(data, LOWCUT, HIGH CUT, sample_rate, ORDER)

base_filename = os.path.basename(input_path)
name, ext = os.path.splitext(base_filename)
output_filename = f"{name}_bat4{ext}"
output_path = os.path.join(output_dir, output_filename)

filtered_int16 = np.int16(filtered / np.max(np.abs(filtered)) * 32767)
wavfile.write(output_path, sample_rate, filtered_int16)
print(f"Файл сохранён: {output_path}")

```

Приложение Д

```
import numpy as np
import scipy.io.wavfile as wav
import matplotlib.pyplot as plt

def compute_bandwidth(file_path, energy_threshold=0.99):
    fs, x = wav.read(file_path)

    n = len(x)
    freqs = np.fft.rfftfreq(n, 1 / fs)
    spectrum = np.abs(np.fft.rfft(x))
    power = spectrum ** 2

    total_energy = np.sum(power)
    cumulative_energy = np.cumsum(power) / total_energy

    low_idx = np.where(cumulative_energy >= (1 - energy_threshold) / 2)[0][0]
    high_idx = np.where(cumulative_energy >= 1 - (1 - energy_threshold) / 2)[0][0]

    low_freq = freqs[low_idx]
    high_freq = freqs[high_idx]
    bandwidth = high_freq - low_freq

    print(f'Ширина полосы сигнала ({energy_threshold * 100:.1f}% энергии):  
{bandwidth:.2f} Гц')
    print(f'Диапазон: от {low_freq:.2f} Гц до {high_freq:.2f} Гц')

    plt.figure(figsize=(8, 4))
    plt.plot(freqs, spectrum)
    plt.axvline(low_freq, color='g', linestyle='--', label='Нижняя граница')
    plt.axvline(high_freq, color='r', linestyle='--', label='Верхняя граница')
    plt.xlabel("Частота (Гц)")
    plt.ylabel("Амплитуда")
    plt.title("")
    plt.legend(loc='upper right')
    plt.grid()
    plt.tight_layout()
    plt.show()

compute_bandwidth("/path/to/file/")
```

Приложение Е

```

import numpy as np
import scipy.io.wavfile as wav
import matplotlib.pyplot as plt

def compute_bandwidth(file_path, energy_threshold=0.99):
    fs, x = wav.read(file_path)

    if x.ndim > 1:
        x = x[:, 0]
    if x.dtype != np.float32:
        x = x / np.max(np.abs(x))

    n = len(x)
    freqs = np.fft.rfftfreq(n, 1 / fs)
    spectrum = np.abs(np.fft.rfft(x))
    power = spectrum ** 2

    total_energy = np.sum(power)
    cumulative_energy = np.cumsum(power) / total_energy

    low_idx = np.where(cumulative_energy >= (1 - energy_threshold) / 2)[0][0]
    high_idx = np.where(cumulative_energy >= 1 - (1 - energy_threshold) / 2)[0][0]

    low_freq = freqs[low_idx]
    high_freq = freqs[high_idx]
    bandwidth = high_freq - low_freq

    print(f"Ширина полосы сигнала ( {energy_threshold * 100:.1f}% энергии):  

    {bandwidth:.2f} Гц")
    print(f"Диапазон: от {low_freq:.2f} Гц до {high_freq:.2f} Гц")

compute_bandwidth("/file/to/path/")

```

Приложение Ж

```
import numpy as np
import scipy.io.wavfile as wav
import os

def compute_power_db(file_path):
    if not os.path.exists(file_path):
        print(f'Файл не найден: {file_path}')
        return

    fs, x = wav.read(file_path)

    if x.ndim > 1:
        x = x[:, 0]

    x = x.astype(np.float32)
    x /= np.max(np.abs(x))

    power = np.mean(x**2)

    power_db = 10 * np.log10(power + 1e-12)

    print(f'Мощность сигнала {os.path.basename(file_path)} в дБ: {power_db:.2f} дБ")
    print(f'Мощность сигнала {os.path.basename(file_path)}: {power:.6f} ")

compute_power_db("/file/to/path/")
```

Приложение 3

```
import numpy as np
import scipy.io.wavfile as wav
from scipy.stats import skew, kurtosis
import os

def compute_skew_kurtosis(file_path):
    if not os.path.exists(file_path):
        print(f'Файл не найден: {file_path}')
        return

    fs, x = wav.read(file_path)

    if x.ndim > 1:
        x = x[:, 0]

    if x.dtype != np.float32:
        x = x / np.max(np.abs(x))

    skewness = skew(x)
    excess_kurtosis = kurtosis(x, fisher=True)

    print(f'Асимметрия (skewness) для {os.path.basename(file_path)}: {skewness:.2f}')
    print(f'Экцесс (kurtosis) для {os.path.basename(file_path)}: {excess_kurtosis:.2f}')

compute_skew_kurtosis("/file/to/path/")
```

Приложение И

```
import numpy as np
from scipy.io import wavfile

filepath = '/file/to/path/'

full_scale_voltage_rms = 1.4
mic_sensitivity_v_per_pa = 0.01

rate, data = wavfile.read(filepath)

if len(data.shape) > 1:
    data = data.mean(axis=1)

assert data.dtype == np.int16, "Этот код работает только с int16 WAV-файлами"

digital_max = 32767
rms_digital = np.sqrt(np.mean(data.astype(np.float64)**2))

rms_voltage_out = (rms_digital / digital_max) * full_scale_voltage_rms

rms_millivolts = rms_voltage_out * 1000

print(f"Амплитуда сигнала на выходе интерфейса: {rms_millivolts:.2f} мВ")
```

Приложение К

```
import os
import soundfile as sf
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

folder_path1 = '/file/to/path/'
folder_path2 = '/file/to/other/path/'

file_names1 = sorted([
    'ПВХ21батдис.wav', 'ПВХ22батдис.wav', 'ПВХ23батдис.wav',
    'ПЭТ21батдис.wav', 'ПЭТ22батдис.wav', 'ПЭТ23батдис.wav',
    'поли21батдис.wav', 'поли22батдис.wav', 'поли23батдис.wav',
])

file_names2 = sorted([
    'ПВХ21дис.wav', 'ПВХ22дис.wav', 'ПВХ23дис.wav',
    'ПЭТ21дис.wav', 'ПЭТ22дис.wav', 'ПЭТ23дис.wav',
    'поли21дис.wav', 'поли22дис.wav', 'поли23дис.wav',
])

all_file_paths = [os.path.join(folder_path1, name) for name in file_names1] + \
    [os.path.join(folder_path2, name) for name in file_names2]
all_file_names = file_names1 + file_names2

signals = []

cut_start_sec = 0.9
segment_duration_sec = 0.05

for path in all_file_paths:
    data, samplerate = sf.read(path)
    if data.ndim > 1:
        data = data[:, 0]

    start_sample = int(cut_start_sec * samplerate)
    end_sample = start_sample + int(segment_duration_sec * samplerate)

    if len(data) < end_sample:
        raise ValueError(f"Файл {path} слишком короткий: {len(data)} сэмплов,
        нужно минимум {end_sample}")
```

```
segment = data[start_sample:end_sample]
signals.append(segment)

matrix = np.stack(signals)
correlation_matrix = np.corrcoef(matrix)

plt.figure(figsize=(14, 12))
sns.heatmap(correlation_matrix, annot=True, fmt=".2f", cmap='coolwarm',
            xticklabels=all_file_names, yticklabels=all_file_names)
plt.title("Корреляционная матрица аудиосигналов до фильтрации")
plt.xticks(rotation=90)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Приложение Л

```
import os
import soundfile as sf
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from scipy.stats import pearsonr

folder_path1 = '/file/to/path/'
folder_path2 = '/file/to/other/path/'

file_names1 = sorted([
    'ПВХ21бат4дис.wav', 'ПВХ22бат4дис.wav', 'ПВХ23бат4дис.wav',
    'ПЭТ21бат4дис.wav', 'ПЭТ22бат4дис.wav', 'ПЭТ23бат4дис.wav',
    'поли21бат4дис.wav', 'поли22бат4дис.wav', 'поли23бат4дис.wav',
])

file_names2 = sorted([
    'ПВХ21дис.wav', 'ПВХ22дис.wav', 'ПВХ23дис.wav',
    'ПЭТ21дис.wav', 'ПЭТ22дис.wav', 'ПЭТ23дис.wav',
    'поли21дис.wav', 'поли22дис.wav', 'поли23дис.wav',
])

all_file_paths = [os.path.join(folder_path1, name) for name in file_names1] + \
    [os.path.join(folder_path2, name) for name in file_names2]
all_file_names = file_names1 + file_names2

signals = []

cut_start_sec = 0.3
segment_duration_sec = 0.2

for path in all_file_paths:
    data, samplerate = sf.read(path)
    if data.ndim > 1:
        data = data[:, 0]

    start_sample = int(cut_start_sec * samplerate)
    end_sample = start_sample + int(segment_duration_sec * samplerate)

    if len(data) < end_sample:
        raise ValueError(f'Файл {path} слишком короткий: {len(data)} сэмплов,
```

```
нужно минимум {end_sample}")
```

```
    segment = data[start_sample:end_sample]  
    signals.append(segment)
```

```
matrix = np.stack(signals)  
correlation_matrix = np.corrcoef(matrix)
```

```
n_signals = matrix.shape[0]  
p_value_matrix = np.zeros((n_signals, n_signals))
```

```
for i in range(n_signals):  
    for j in range(n_signals):  
        _, p = pearsonr(matrix[i], matrix[j])  
        p_value_matrix[i, j] = p
```

```
plt.figure(figsize=(18, 14))  
sns.heatmap(p_value_matrix, annot=True, fmt=".e", cmap='viridis',  
            xticklabels=all_file_names, yticklabels=all_file_names)  
plt.title("P-value матрица для корреляций между аудиосигналами до и после  
фильтрации")  
plt.xticks(rotation=90)  
plt.tight_layout()  
plt.show()
```

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломный проект Куаныш Дарины
по специальности 6В07111 – Робототехника и Мехатроника

На тему: Исследование работы акустической системы классификации материалов

Выполнено:

- а) графическая часть на 23 листах
б) пояснительная записка на 38 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

В работе представлены введение, четыре раздела, заключение, список литературы и приложения, а также 26 рисунков и 9 таблиц. Текст работы логично структурирован, основные главы последовательно раскрывают теоретическую основу исследования, акустические методы анализа материалов и конструкций, выбор аппаратной составляющей, методы оценки акустических сигналов. Текст изложен технически грамотно, для описания результатов исследования применяется техническая терминология.

Актуальность обосновывается тем, что существующие методы классификации не имеют компромисса между ограниченными физико-химическими методами и ресурсоемкими нейросетевыми моделями. С научной точки зрения ценность заключается в приложении метода дифференциации материалов на основе различимости признаков акустических сигналов.

Разработанная система фильтрации продемонстрировала устойчивое улучшение сигнала, что подтверждено вычислением и сравнением отношений сигнал/помеха и корреляционным анализом.

Оценка параметров проведена в соответствии с разработанным алгоритмом, каждая группа результатов детально рассмотрена, численные результаты взяты в качестве основания для классификации по соответствующему параметру.

В заключении представлены выводы о проделанной работе и возможности для улучшения качества классификации при дальнейшей работе над проектом. Дополнительно, было бы информативнее представлять результаты не только в табличном виде, а еще в графическом виде для всех образцов.

Оценка работы

Работа представлена завершенной и заслуживает 88 оценки. При успешной защите Куаныш Д. достойна присвоения академической степени бакалавра технических наук.

Рецензент
Ph.D. ассоциированный профессор
Муратов М. М.
(подпись)

«30» май 2025 г.

ОТЗЫВ

дипломной работы

студентки специальности 6В07111 – «Робототехника и мехатроника»

Куаныш Дарина

На тему: **«Исследование работы акустической системы классификации материалов»**

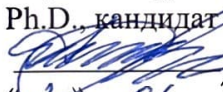
Настоящая выпускная квалификационная работа студентки Куаныш Дарина посвящена разработке схемы классификации акустических сигналов по их характеристикам с целью дальнейшего применения данной схемы в задачах идентификации материалов в промышленных и лабораторных условиях. Данная работа направлена на исследование работы разработанной акустической системы классификации материалов.

В процессе выполнения работы Куаныш Дарина продемонстрировала высокий уровень теоретической подготовки в области робототехники и мехатроники, в частности электроники и моделировании динамических систем, а также владением программной средой Python. В работе проведен глубокий обзор акустических методов анализа материалов и конструкций, а также методов идентификации материалов, проведен сравнительный анализ однонаправленной и двунаправленной методов фильтрации сигналов с помощью оценки отношения сигнала к помехам и корреляционного анализа. Разработан специализированный алгоритм оценки параметров акустического сигнала, включающий в свою структуру расчет и оценку полосы частот акустического сигнала, мощности и распределения. Выявленные особенности и измеренные значения параметров обработанных акустических сигналов между собой являются уникальными для каждой группы зарегистрированных сигналов от материалов.

Дипломная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, содержит все необходимые структурные элементы, грамотно оформлена на техническом языке, поставленные цели и задачи достигнуты в полном объеме. Считаю, что дипломная работа Куаныш Дарины заслуживает оценки «отлично».

Научный руководитель

Ph.D., кандидат технических наук, старший преподаватель

 Алтай Е.А.

« 2 » 06 2025 г.



Отчет подобия

Метаданные

Название организации

Satbayev University

Название

Исследование работы акустической системы классификации материалов

Автор

Научный руководитель / Эксперт

Куаныш ДаринаАлтай Ельдос

Подразделение

ИАиИТ

Объем найденных подоби

КП-ия определяют, какой процент текста по отношению к общему объему текста был найден в различных источниках.. Обратите внимание!Высокие значения коэффициентов не означают плагиат. Отчет должен быть проанализирован экспертом.



КП1

25

Длина фразы для коэффициента подобия 2



КП2

9159

Количество слов



КЦ

72847

Количество символов

Тревога

В этом разделе вы найдете информацию, касающуюся текстовых искажений. Эти искажения в тексте могут говорить о ВОЗМОЖНЫХ манипуляциях в тексте. Искажения в тексте могут носить преднамеренный характер, но чаще, характер технических ошибок при конвертации документа и его сохранении, поэтому мы рекомендуем вам подходить к анализу этого модуля со всей долей ответственности. В случае возникновения вопросов, просим обращаться в нашу службу поддержки.

Замена букв	Б	11
Интервалы	A→	0
Микропробелы	·	6
Белые знаки	Б	1
Парафразы (SmartMarks)	a	1

Подобия по списку источников

Ниже представлен список источников. В этом списке представлены источники из различных баз данных. Цвет текста означает в каком источнике он был найден. Эти источники и значения Коэффициента Подобия не отражают прямого плагиата. Необходимо открыть каждый источник и проанализировать содержание и правильность оформления источника.

10 самых длинных фраз

Цвет текста

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	https://www.bestreferat.ru/referat-132469.html	20 0.22 %

из базы данных RefBooks (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

из домашней базы данных (0.00 %)



ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

из программы обмена базами данных (0.00 %)



ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

из интернета (0.22 %)



ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	ИСТОЧНИК URL	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	https://www.bestreferat.ru/referat-132469.html	20 (1) 0.22 %

Список принятых фрагментов

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	СОДЕРЖАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
	https://www.bestreferat.ru/referat-132469.html	20 (0.22%)