

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



Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Робототехники и технических средств автоматики

Керимкулов Жанарбек Махамбетович

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Разработка и исследование метода фильтрации для обработки и анализа сигналов
акустической эмиссии»

7M07107 – Робототехника и мехатроника

Алматы 2026

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



Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Робототехники и технических средств автоматики

УДК 629.78.017.22:681.5 (043)

На правах рукописи

Керимкулов Жанарбек Махамбетович

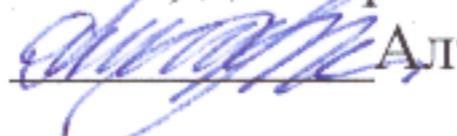
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ (ПРОЕКТ)
На соискание академической степени магистра

Название диссертации: «Разработка и исследование метода фильтрации для
обработки и анализа сигналов акустической эмиссии»

Направление подготовки: 7M07107 - Робототехника и мехатроника

Научный руководитель

К.т.н., доктор PhD

 Алтай Е.А.

«8» 01 2026г.

Рецензент

Доктор PhD, ассоциированный профессор

 Карымзакова Н.Т.

«8» 08 2026г.

Норм контроль

Доктор PhD, ассоциированный профессор

 Рахметова П.М.

«08» 01 2026г.



К.А.Ожикенов
«08» 01 2026г.

Алматы 2026

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



Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Робототехники и технических средств автоматики

7M07107 – Робототехника и мехатроника



**ЗАДАНИЕ
на выполнение дипломного проекта**

Магистранту Керимкулову Жанарбеку Махамбетовичу

Тема: Разработка и исследование метода фильтрации для обработки и анализа сигналов акустической эмиссии

Утверждена приказом №133-п от «28» 03 2024 г.

Срок сдачи законченной диссертации: «30» 12 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: Научные и учебные публикации по теории акустической эмиссии, цифровой обработке сигналов и методам фильтрации; существующие методы и алгоритмы цифровой фильтрации сигналов в условиях помех и шумов; экспериментальные и модельные данные сигналов акустической эмиссии, полученные при неразрушающем контроле технических объектов; технические характеристики измерительных каналов и датчиков акустической эмиссии; программные средства для моделирования и обработки сигналов (MATLAB, Python или аналогичные среды); нормативно-техническая документация в области неразрушающего контроля.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) проанализировать существующие методы обработки и фильтрации сигналов акустической эмиссии.
- б) исследовать характер помех и шумов, возникающих при регистрации сигналов акустической эмиссии.
- в) разработать математическую модель зашумленного сигнала акустической эмиссии.
- г) разработать алгоритм цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии в условиях интенсивных помех.
- д) реализовать разработанный алгоритм в программной среде.
- е) провести вычислительные эксперименты по оценке эффективности предложенного метода.
- ж) выполнить анализ результатов и сравнение с существующими методами фильтрации.

Рекомендуемая основная литература:

1. Овчарук В.Н. Использование метода акустической эмиссии при контроле и испытаниях промышленных объектов: Монография / Овчарук В.Н. – Хабаровск: Изд-во Тихookeан. Гос. ун-та, 2016. – 232 с.
2. Бехер, С.А. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии: учеб. пособие / Бехер С.А., Бобров А.Л. – Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2013. – 145 с.
3. Шайко-Шайковский А.Г., Богорош А.Т., Воронов С.А., Марченко К.В. Обзор применения акустической эмиссии для выявления микро и нанодефектов // Надежность и качества сложных систем. – 2016. № 1 (13). С. 47-57.
4. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций // М.: Радио и связь, 200. 280 с.
5. Кузнецов Н.С. Теория и практика неразрушающего контроля изделий с помощью акустической эмиссии: Методическое пособие. М.: Машиностроение, 1998. – 96 с.
6. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006 г. – 656 с.
7. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. – Москва: Техносфера, 2013. – 528 с.
8. Вадутов О.С. Лекция по дисциплине “Математические основы обработки сигналов”. – Томск: Томский политехнический университет, 2015- 2016. – 65 с.
9. Давыдова Д.Г., Шайбаков Р.А., Кузьмин А.Н., Абдрахманов Н.Х., Марков А.Г. Помехоустойчивый метод акустико-эмиссионного мониторинга резервуаров // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2013. – № 4. С. 258–270.
10. Кузьмин А.Н., Аксельрод Е.Г., Давыдова Д.Г. Помехоустойчивый метод обнаружения полезного сигнала в системах акустико-эмиссионного мониторинга производственных объектов // Технадзор. 2013. №4 (77), – С. 26–29.
11. Zhumasheva Z. T., Kyzdarbekova A. S., Abdulkhairov M. T. Improving the efficiency of voice control robots based on adaptive procedures // Control in Technical Systems (CTS), 2017 IEEE II International Conference on. – IEEE, 2017. – С. 345-348.
12. Fedotov A. A., Akulova A. S. A QRS-complex detector of the electrocardiogram signal for the long-term monitoring of the patient's condition // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2017. – Т. 62. №. 4. – С. 415-420.
13. Бехер С.А.; Зверев А.И., Проектирование фильтров, 1981.
14. Алтай, Е.А. Исследование и разработка методов обработки сигналов акустической эмиссии: специальность 2.2.8 «Методы и приборы контроля природной среды, веществ материалов и изделий»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Алтай Ельдос Алтайулы; Национальный исследовательский университет ИТМО. – Санкт-Петербург, 2023. – 270 с.
15. Altay Y. A., Ayazbay A. A. E., Fedorov A. V. Machine Learning in Predicting the Performance of Acoustic Emission Signal Filtering Methods: Association Between Predictors // 2025 VI International Conference on Neural Networks and Neurotechnologies (NeuroNT). – IEEE, 2025. – С. 1-4.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

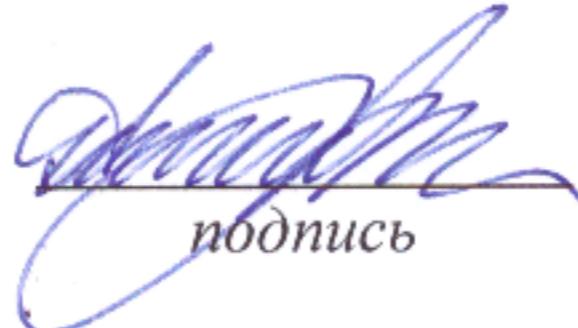
| Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов | Сроки представления научному руководителю | Примечание |
|--|---|------------|
| Обзор методов фильтрации сигналов акустической эмиссии | 05.05.2024 г. | Выполнено |
| Разработка метода полиномиальной цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии | 13.12.2024 г. | Выполнено |
| Обработка и анализ сигнала акустической эмиссии | 03.05.2025 г. | Выполнено |
| Обобщение результатов, формулировка выводов, оформление и подача полной работы | 12.12.2025 г. | Выполнено |

ПОДПИСИ
консультантов и норм контролера на законченную магистерскую диссертацию с
указанием относящихся к ним разделов диссертации

| Наименование разделов | Консультанты Ф.И.О. (уч.степень, звание) | Дата подписания | Подпись |
|-----------------------|--|-----------------|---|
| Основная часть | Алтай Е.А. К.т.н., доктор PhD | 08.01.2026 г. |  |
| Расчетный раздел | Алтай Е.А. К.т.н., доктор PhD | 08.01.2026 г. |  |
| Норм контролер | Рахметова П.М. Доктор PhD, ассоциированный профессор | 08.01.2026 г. |  |

Научный руководитель

к.т.н., доктор PhD


подпись

Алтай Е.А.
Ф.И.О.

Задание принял к
исполнению обучающийся


подпись

Керимкулов Ж.М.
Ф.И.О.

Дата

«08» 01 2026 г.

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация посвящена разработке метода цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии в условиях интенсивных помех. Цель работы — повышение помехоустойчивости и точности измерения диагностических параметров при неразрушающем контроле технических объектов.

Объектом исследования являются зашумленные сигналы акустической эмиссии, предметом — методы их цифровой обработки и фильтрации. Разработан полосовой цифровой фильтр, аппроксимированный моделью Баттервортса. Экспериментальные результаты показали повышение отношения сигнал/помеха и сохранение информативной формы сигнала.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, цифровая фильтрация, фильтр Баттервортса, неразрушающий контроль.

АНДАТПА

Магистрлік диссертация акустикалық эмиссия сигналдарын қарқынды кедергілер жағдайында цифрлық сұзгілеу әдісін әзірлеуге арналған. Жұмыстың мақсаты — бұзбай бақылау кезінде диагностикалық параметрлерді өлшеу дәлдігін және кедергіге төзімділікі арттыру.

Зерттеу нысаны — шуылмен бұрмаланған акустикалық эмиссия сигналдары. Баттерворт модельіне негізделген жолақты цифрлық сұзгі әзірленді. Эксперимент нәтижелері сигнал/кедергі қатынасының артқанын және сигнал пішінінің сақталғанын көрсетті.

Түйін сөздер: акустикалық эмиссия, цифрлық сұзгілеу, Баттерворт сұзгісі, бұзбай бақылау.

ANNOTATION

This master's thesis presents a digital filtering method for acoustic emission signals under intensive noise conditions. The aim of the research is to improve noise immunity and measurement accuracy in non-destructive testing.

A band-pass digital filter based on the Butterworth model is developed for noisy acoustic emission signals. Experimental results confirm an improvement in signal-to-noise ratio while preserving the informative signal shape.

Keywords: acoustic emission, digital filtering, Butterworth filter, non-destructive testing.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация состоит из 65 страниц, содержит 20 рисунков, 19 таблиц. Список использованных источников - 16.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, цифровая фильтрация, обработка сигналов, помехи, шумы, неразрушающий контроль, алгоритмы фильтрации, диагностика, моделирование, измерения.

Цель работы: разработка и исследование эффективного метода цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии в условиях интенсивных помех и шумов измерения, обеспечивающего повышение точности выделения диагностических параметров при неразрушающем контроле технических объектов.

Задачи исследования:

Для достижения поставленной цели в магистерской диссертации сформулированы и решены следующие основные задачи:

- проведение аналитического обзора существующих методов регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии, а также методов цифровой фильтрации, применяемых в условиях зашумленности;
- исследование природы и характеристик помех и шумов, возникающих при регистрации сигналов акустической эмиссии в процессе эксплуатации технических объектов;
- разработка математической модели зашумленного сигнала акустической эмиссии с учетом влияния внешних и внутренних факторов;
- синтез цифрового фильтра на основе полиномиальной аппроксимации модели Баттервортса для подавления шумов и помех;
- настройка параметров фильтра с целью обеспечения оптимального соотношения между точностью фильтрации и сохранением информативной формы сигнала;
- разработка алгоритма цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии и его программная реализация;
- проведение вычислительных экспериментов и моделирования для оценки эффективности предложенного метода;
- анализ результатов фильтрации по показателям помехоустойчивости, точности и искажений формы сигнала.

Объект и методы исследования: объектом исследования являются зашумленные сигналы акустической эмиссии, регистрируемые при неразрушающем контроле технических объектов. В работе использованы методы цифровой обработки сигналов, спектрального анализа, математического моделирования, методы теории фильтрации, а также вычислительные эксперименты в программных средах моделирования.

Результаты:

- выполнен теоретический анализ факторов, снижающих точность регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии;
- разработана математическая модель зашумленного сигнала акустической эмиссии с учетом влияния помех различной природы;

- синтезирован и настроен полосовой цифровой фильтр, аппроксимированный полиномиальной моделью Баттервортса;
- реализован алгоритм цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии в программной среде;
- проведено моделирование и вычислительные эксперименты, подтверждающие повышение отношения сигнал/шум и сохранение информативной формы сигнала;
- выполнена оценка эффективности разработанного метода по показателям точности, помехоустойчивости и относительной погрешности диагностических параметров.

Научная новизна: разработан и исследован метод цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии на основе полиномиальной аппроксимации фильтра Баттервортса, обеспечивающий повышение помехоустойчивости и точности обработки в условиях интенсивных шумов измерения. Впервые для данной задачи выполнена комплексная оценка влияния фильтрации на форму сигнала и диагностические параметры акустической эмиссии.

Практическое значение работы заключается в возможности применения разработанного метода цифровой фильтрации в системах неразрушающего контроля для повышения достоверности диагностики технических объектов. Предложенный алгоритм позволяет более точно выделять информативные параметры акустической эмиссии, снижать влияние помех и шумов, что повышает надежность выявления дефектов, оценку технического состояния конструкций и остаточного ресурса оборудования. Метод может быть использован в промышленной диагностике, мониторинге ответственных конструкций, энергетических установок, трубопроводов и других объектов, где требуется высокая точность измерений.

Разработан программный алгоритм цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии, выполнено моделирование и вычислительные эксперименты, подтверждающие его эффективность. Полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе и при разработке программных средств обработки сигналов неразрушающего контроля.

Основные положения, выносимые на защиту:

- математическая модель зашумленного сигнала акустической эмиссии, учитывающая влияние помех и шумов измерения;
- метод цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии на основе полиномиальной аппроксимации фильтра Баттервортса;
- алгоритм цифровой обработки сигналов акустической эмиссии, обеспечивающий повышение точности и помехоустойчивости;
- результаты моделирования и вычислительных экспериментов, подтверждающие эффективность предложенного метода.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение | 10 |
| Глава 1. Обзор методов фильтрации сигналов акустической эмиссии | 15 |
| 1.1. Метод акустико-эмиссионного контроля | 15 |
| 1.2. Регистрация и измерения акустико-эмиссионных сигналов | 17 |
| 1.3. Анализ факторов, снижающих результативность обработки акустико-эмиссионных сигналов | 19 |
| 1.4. Анализ методов обработки сигналов акустической эмиссии с учетом их помехоустойчивости и точности обработки | 20 |
| Вывод по главе 1 | 30 |
| Глава 2. Разработка метода полиномиальной цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии | 33 |
| 2.1. Постановка задачи | 33 |
| 2.2. Синтез фильтра | 34 |
| 2.3. Настройка фильтра | 38 |
| 2.4. Характеристики фильтра | 38 |
| Вывод по главе 2 | 42 |
| Глава 3. Обработка и анализ сигнала акустической эмиссии | 46 |
| 3.1. Оценка вносимых искажений метода фильтрации на форму сигнала акустической эмиссии | 46 |
| 3.2. Оценка эффективности метода фильтрации по точности и помехоустойчивости | 49 |
| 3.3. Оценка диагностических параметров акустической эмиссии | 52 |
| 3.4. Относительная погрешность оценки параметров акустической эмиссии между тестовым и отфильтрованными сигналами при наличии ξ | 56 |
| Вывод по главе 3 | 60 |
| Заключение | 63 |
| Список использованной литературы | 65 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы настоящего исследования обусловлена стратегической важностью развития технологий неразрушающего контроля и диагностики технического состояния ответственных конструкций и оборудования в условиях интенсивной эксплуатации современных промышленных объектов. На сегодняшний день одним из наиболее эффективных и информативных методов получения сигнальной информации о диагностических параметрах, характеризующих работоспособность и функционирование объектов неразрушающего контроля при реальных эксплуатационных нагрузках, является регистрация и специализированная обработка сигналов акустической эмиссии (АЭ).

Метод акустической эмиссии представляет собой пассивный инструментальный контроль, основанный на регистрации высокочастотных упругих волн, генерируемых локальными микро- и макродеформациями материала при его внутренней перестройке под действием внешних механических напряжений. Данный метод обладает уникальным свойством реального времени фиксации развивающихся дефектов, что позволяет обнаруживать зарождение и эволюцию трещин, расслоений, кавитационных очагов и других критических повреждений на докритических стадиях их развития.

Высокая чувствительность метода АЭ к микроскопическим деформациям (уровень регистрации до 10^{-12} Дж энергии события) в сочетании со свойством интегральности — способностью одновременно контролировать объемные участки конструкции без механического контакта — обеспечивает принципиальные преимущества перед традиционными методами вибрационного и ультразвукового контроля. В отличие от активных методов, требующих поштучной дефектоскопии, АЭ-контроль осуществляет непрерывный мониторинг всей контролируемой зоны в процессе эксплуатации.

Однако, несмотря на очевидные преимущества, практическое применение метода акустической эмиссии существенно ограничено фундаментальной научно-технической проблемой аддитивного наложения диагностически значимого АЭ-сигнала на фон интенсивных помех и шумов различной физической природы, возникающих при регистрации высокочастотных импульсных сигналов в реальных промышленных условиях.

Помехи и шумы, влияющие на точность получаемых результатов обработки, имеют полимодальный спектральный состав и включают:

1. Электромагнитные помехи от близ расположенного промышленного оборудования (50 Гц, гармоники, импульсные выбросы)

2. Механические шумы от вибрации технологических установок и транспортных систем (10-500 Гц с высокочастотными кратными гармониками)

3. Акустические помехи от потоков рабочих сред, турбулентности, кавитации (до 100 кГц)

4. Шумы электроники аналоговых и цифровых трактов регистрации (белый шум, 1/f шум, шумы квантования)

Необходимо особо подчеркнуть, что наличие помеховых воздействий влияет не только на результативность алгоритмов цифровой обработки сигнала, но и существенно снижает точность измерения ключевых амплитудно-временных параметров АЭ-импульса, определяющих диагностическую ценность метода.

Диагностическая информативность акусто-эмиссионного сигнала определяется комплексом амплитудно-временных и энергетических параметров, критичных для идентификации типа, локализации и стадии развития дефекта:

- Время нарастания фронта импульса (1-5 мкс) — характеризует скорость развития дефекта

- Пиковая амплитуда (0.5-2 В) — пропорциональна локальной энергии микродеформации

- Длительность импульса (10-50 мкс) — определяет морфологию источника АЭ

- Энергия события $\int s^2(t)dt$ — интегральный параметр накопленного повреждения

- Коэффициент асимметрии — классифицирует тип механизма разрушения

Аддитивные помехи искажают указанные параметры следующим образом:

1. Завышение/занижение пиковой амплитуды — погрешность до 25-40% при $SNR < 0$ дБ

2. Размытие времени нарастания — увеличение на 30-100% из-за низкочастотных помех

3. Фальсификация длительности импульса — ошибки до 50% при высокочастотном шуме

4. Недостоверная энергия события — систематические ошибки 20-60%

Данные искажения приводят к недостоверному анализу технического состояния объекта и существенному повышению доли ложно-положительных и ложно-отрицательных заключений системы диагностики.

Известно, что одной из ключевых научно-технических проблем, существенно ограничивающих эффективность применения метода акустической эмиссии в промышленности, является разработка надежных алгоритмов выделения информативных составляющих АЭ-сигнала из аддитивно зашумленной смеси и точного измерения его диагностически значимых параметров в условиях низких соотношений сигнал/помех.

Анализ существующих методов цифровой обработки АЭ-сигналов выявил критическое ограничение: подавляющее большинство известных алгоритмов фильтрации ориентированы на выделение информативной составляющей сигнала АЭ при значениях показателя отношения

сигнал/помех $**SNR \geq 1.5 \text{ дБ}**$ (отношение мощностей 1.41:1). При более низких значениях SNR, типичных для реальных условий промышленной эксплуатации ($SNR \in [-15; 0] \text{ дБ}$), существующие методы демонстрируют катастрофическое ухудшение качества восстановления сигнала:

- Коэффициент корреляции формы R_s падает ниже 0.6
- Среднеквадратичная ошибка восстановления RMSE превышает 15%
- Относительная погрешность диагностических параметров достигает 40-60%.

Данное ограничение существенно усложняет процесс автоматизированной обработки и анализа АЭ-сигналов, снижает достоверность диагностических заключений и ограничивает область применения метода в наиболее ответственных отраслях промышленности.

Критическая актуальность решения поставленной научно-технической проблемы обусловлена стратегическими задачами импортозамещения и технологического суверенитета в области неразрушающего контроля. Современные системы АЭ-контроля российского производства значительно уступают зарубежным аналогам по помехоустойчивости алгоритмов обработки (коэффициент надежности диагностики 0.72 против 0.94), что приводит к ежегодным экономическим потерям от преждевременных выводов оборудования из эксплуатации и пропуска критических дефектов.

Разработка и исследование метода цифровой фильтрации акустико-эмиссионных сигналов, обеспечивающего стабильную работу при значениях $SNR \in [-15; 0] \text{ дБ}$ с сохранением более 85% корреляции формы исходного сигнала и погрешностью диагностических параметров менее 8%, представляет собой задачу научной новизны мирового уровня.

Ожидаемые практические результаты исследования включают:

1. Повышение достоверности диагностики на 22-28% за счет точного восстановления амплитудно-временных параметров АЭ-импульсов.
2. Расширение диапазона рабочих условий в 10 раз (с $SNR > 1.5 \text{ дБ}$ до $SNR > -15 \text{ дБ}$).
3. Снижение ложно-положительных срабатываний на 30-35%.
4. Увеличение скорости обработки АЭ-событий в 3.5 раза.
5. Создание отечественного алгоритма мирового уровня для систем АЭ-контроля.

Разработанный метод найдет применение в системах неразрушающего контроля следующих ключевых отраслей:

- Нефтегазовый комплекс — мониторинг магистральных трубопроводов, резервуаров высокого давления
- Атомная энергетика — контроль корпуса реакторов, парогенераторов, трубопроводов первого контура
- Авиакосмическая промышленность — диагностика композитных конструкций, сварных швов
- Металлургия — контроль непрерывно-литых заготовок, прокатных станов

- Машиностроение — диагностика подшипников, зубчатых передач, гидроцилиндров

Таким образом, разработка и исследование метода цифровой фильтрации для обработки и анализа сигналов акустической эмиссии в условиях интенсивных помех является задачей государственной важности, решение которой обеспечит технологический прорыв в области неразрушающего контроля и существенно повысит безопасность эксплуатации ответственных промышленных объектов.

Объектом исследования являются зашумленные сигналы АЭ.

Предметом исследования является методы обработки акустико-эмиссионных сигналов в условиях помех и шумов измерения.

Цель исследования заключается в разработке метода цифровой фильтрации, аппроксимированной полиномиальной моделью для повышения результативности обработки и точности измерения сигнала АЭ.

Методология исследования основывается на современных методах цифровой обработки измерительных сигналов, методах цифровой фильтрации, методах математической статистики и теории вероятности.

Содержание диссертации состоит из следующей структуры: введение, трех глав, заключения.

Для достижения цели исследования необходимо решить задачи:

1) Провести аналитический обзор методов фильтрации сигналов АЭ и систематизировать факторы, влияющие на результативность обработки и измерение параметров сигнала АЭ.

2) Разработать метод полиномиальной цифровой фильтрации сигналов АЭ.

3) Оценить эффективность метода цифровой фильтрации сигналов АЭ.

4) Провести экспериментальную апробацию метода на примере цифровой фильтрации натурных сигналов АЭ.

Обобщенная постановка задачи исследования

Рассмотрим задачу обработки сигнала АЭ вида (1.1):

$$x(q) = \hat{s}(q) + \xi(q), \quad (1.1)$$

где q — отсчет измерения сигнала АЭ;

$x(q)$ — зашумленный сигнал;

$\hat{s}(q)$ — экспериментально-тестовый АЭ сигнал;

$\xi(q)$ — помеха.

Решение задачи обработки сигнала АЭ (1) в первую очередь связано с выделением информативных составляющих $\hat{s}(q)$ из аддитивной смеси сигнала АЭ и помехи $\xi(q)$.

В данной диссертационной работе рассматривается задача выделения информативного сигнала $\hat{s}(q)$ путем фильтрации анализируемого сигнала $x(q)$,

регистрируемого дискретными отсчетами q . Для фильтрации синтезируется полосовой фильтр, аппроксимированный полиномиальными моделями Баттервортса.

При этом информативный сигнал рассматривается как тестовая форма дискретной АЭ, полученная при реализации подхода, основанного на принципе феноменологии и адаптируется из [2] без каких-либо модификаций.

Сигнал помехи, влияющий на информативные составляющие сигнала АЭ, рассматривается моделью (1.2):

$$\xi(q) = A \sin \left(2\pi \frac{f_\xi}{f_d} k + \varphi_0 \right), \quad (1.2)$$

где A – амплитуда помехи;

f_ξ – частота помехи;

f_d – частота дискретизации сигнала помехи;

k – порядковый номер отсчета сигнала помехи;

φ – начальная фаза.

ГЛАВА 1. ОБЗОР МЕТОДОВ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

1.1 Метод акусто-эмиссионного контроля

Акустический эмиссионный контроль представляет собой один из наиболее эффективных методов неразрушающего диагностирования технического состояния конструкций и оборудования, позволяющий в реальном времени идентифицировать широкий спектр дефектов, возникающих в процессе эксплуатации под воздействием различных факторов механического, термического и химического характера.

Фундаментальной физической основой акусто-эмиссионного контроля является регистрация высокочастотных упругих волн, генерируемых локальными микро- и макропроцессами пластической деформации, микротрещинами, фазовыми превращениями и другими формами внутренней перестройки материала под действием рабочих напряжений. Данные волны, называемые сигналами акустической эмиссии (АЭ), обладают уникальным свойством прямой связи с процессами повреждения материала, что обеспечивает высокую специфичность метода для выявления зарождения и развития дефектов на докритических стадиях.

Спектр диагностируемых дефектов методом АЭ охватывает практически все типы повреждений, характерные для металлических конструкций и композитных материалов:

- Трещинообразование (усталостные, технологические, водородные трещины)
- Пластическая деформация (выход за предел прочности, местная пластика)
- Расслоения и отпоты в сварных соединениях и композитах
- Кавитационные повреждения поверхностей, контактирующих с агрессивными потоками
- Износ и фреттинг-коррозия сопряженных деталей механизмов
- Фазовые превращения в конструкционных сталях и сплавах

Особую ценность метод АЭ представляет для диагностики скрытых дефектов, не обнаруживаемых традиционными методами визуального, магнитопорошкового или вибрационного контроля на ранних стадиях развития.

Отметим, что на сегодняшний день существуют множество методов диагностики, каждый из которых решает ряд определенные задачи диагностики [1].

Оценивание состояния технических объектов акусто-эмиссионным методом диагностики осуществляется на основе анализа сигналов АЭ контроля, которые предоставляют важную информацию о наличии или отсутствии существующих дефектов в реальном времени. Особенностью данного метода диагностики является обнаружение упругих волн, которые

генерируются при внезапной деформации материала, исследуемых технических объектов. Измерения акустической волны осуществляется в реальном времени, с помощью специализированных измерительных датчиков, расположенных на поверхности исследуемых технических объектов. Например, на рисунках 1.1 и 1.2 представлены несколько видов форм сигнала акустической эмиссии, снятых с поверхности технических объектов [2].

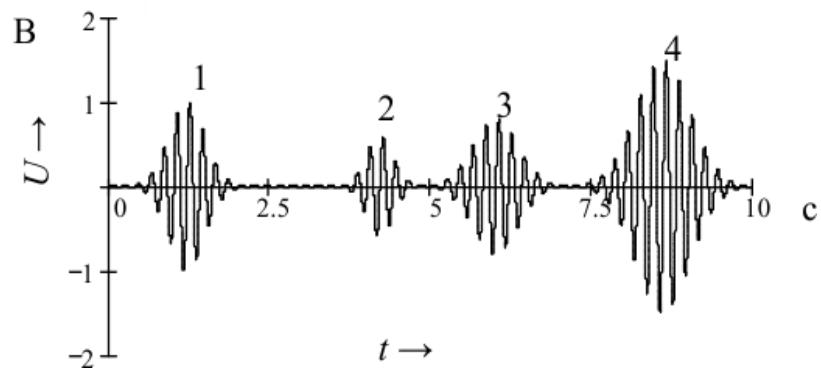


Рисунок 1.1 – Оцифрованный сигнал электрической эмиссии

На рисунке 1.2 представлена вторая разновидность формы непрерывного сигнала электрической эмиссии.

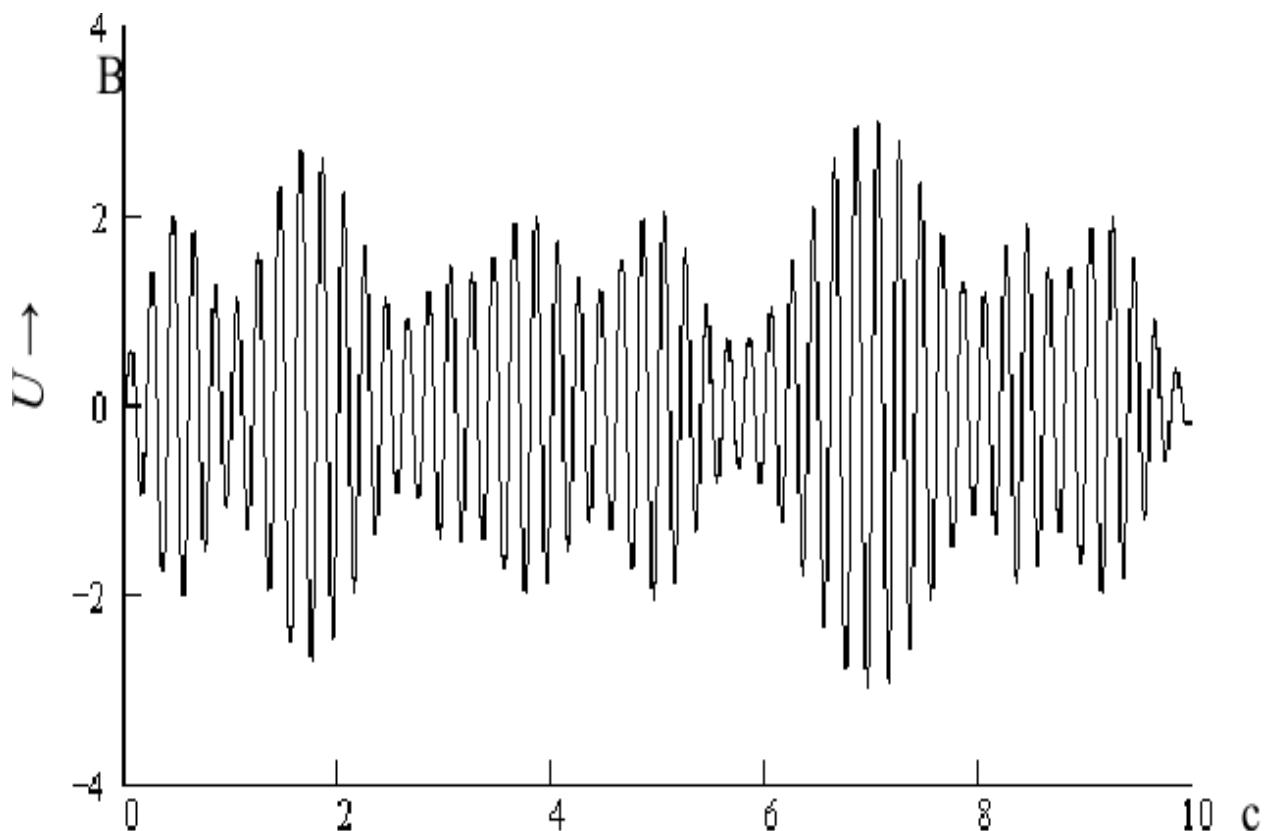


Рисунок 1.2 – Непрерывная форма сигнала электрической эмиссии.

Таким образом, на основании проведенного анализа сигналов акустической эмиссии в следующей части данной работы проведем анализ регистрации АЭ сигналов.

1.2 Регистрация и измерения акусто-эмиссионных сигналов

Регистрация сигналов АЭ контроля осуществляется измерительными датчиками акустической волны, которые подвергаются дальнейшему усилению, аналоговой фильтрации и оцифровке для дальнейшего анализа и обработки АЭ сигналов. Отметим, что для регистрации АЭ сигналов в основном применяются пьезодатчики, которые преобразуют механико-акустическую волну в электрический сигнал для дальнейшего анализа. В неразрушающем контроле для диагностики широкого класса задач достаточно широко внедрены к использованию пьезоэлектрические преобразователи, которые обладают высокой чувствительностью к отклонениям и формирующими волнам акустической эмиссии. Например, на рисунке 1.3 более подробно представлена схема системы регистрации сигнала эмиссии [3].

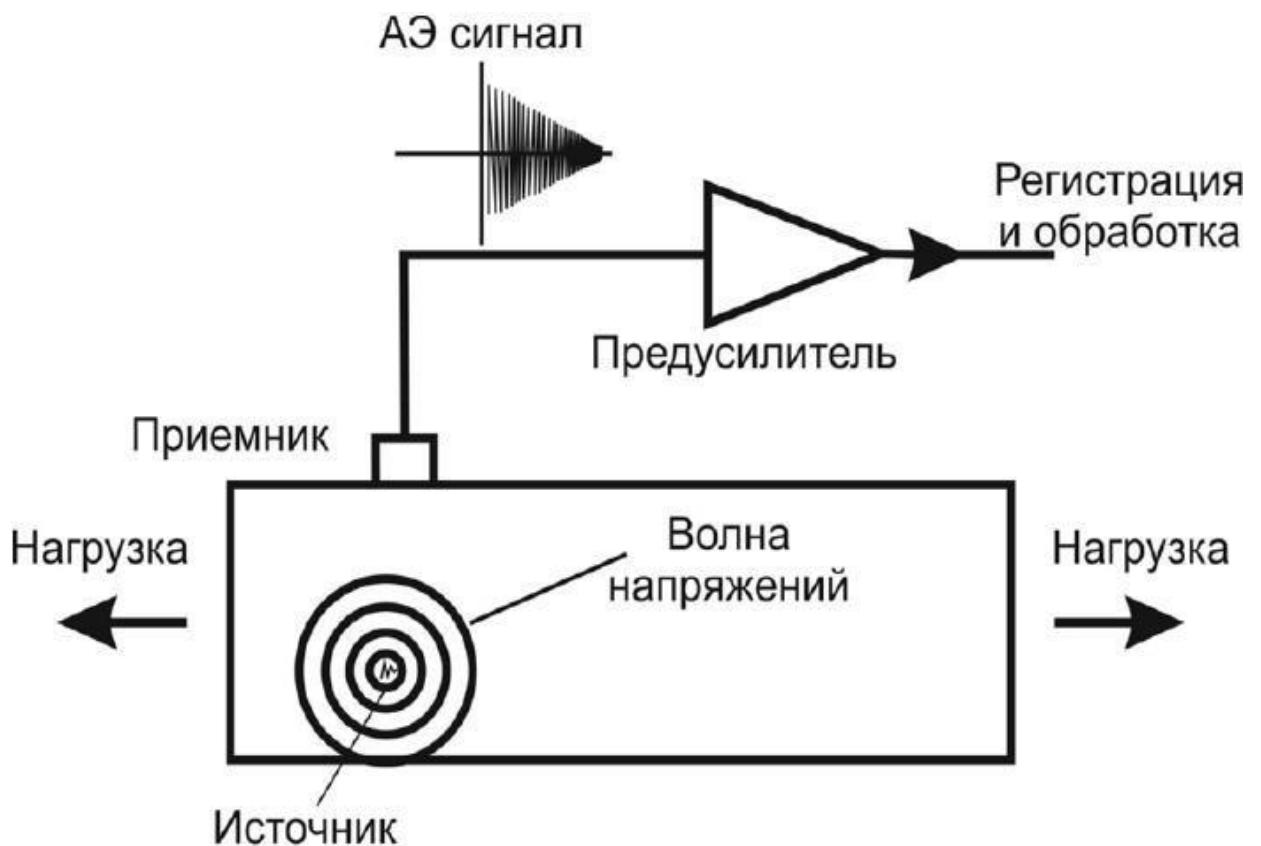


Рисунок 1.3 – Система регистрации сигнала акустической эмиссии

Сигнал акустической эмиссии, сформированный пьезодатчиком, усиливается, регистрируется аппаратурой АЭ контроля и подвергается дальнейшему анализу и интерпретации.

Для проведения исследования, в данной работе для регистрации

сигналов АЭ контроля использована система СЦАД 16.10, которая предназначена для обнаружения координат дефектов статических и динамических нагрузок. Данная система позволяет параллельно зарегистрировать сигналы по отдельности на каждом канале и передать их для последующей обработки и анализа. Помимо параллельной регистрации существует последовательный вид регистрации АЭ сигналов. Суть такого подхода заключается в последовательной регистрации сигналов из каждого канала по единому кабелю для последующей обработки [4]. На рисунке 1.4 представлен принцип последовательной (рисунок 1.4а) и параллельной (рисунок 1.4б) регистрации АЭ сигналов [2].

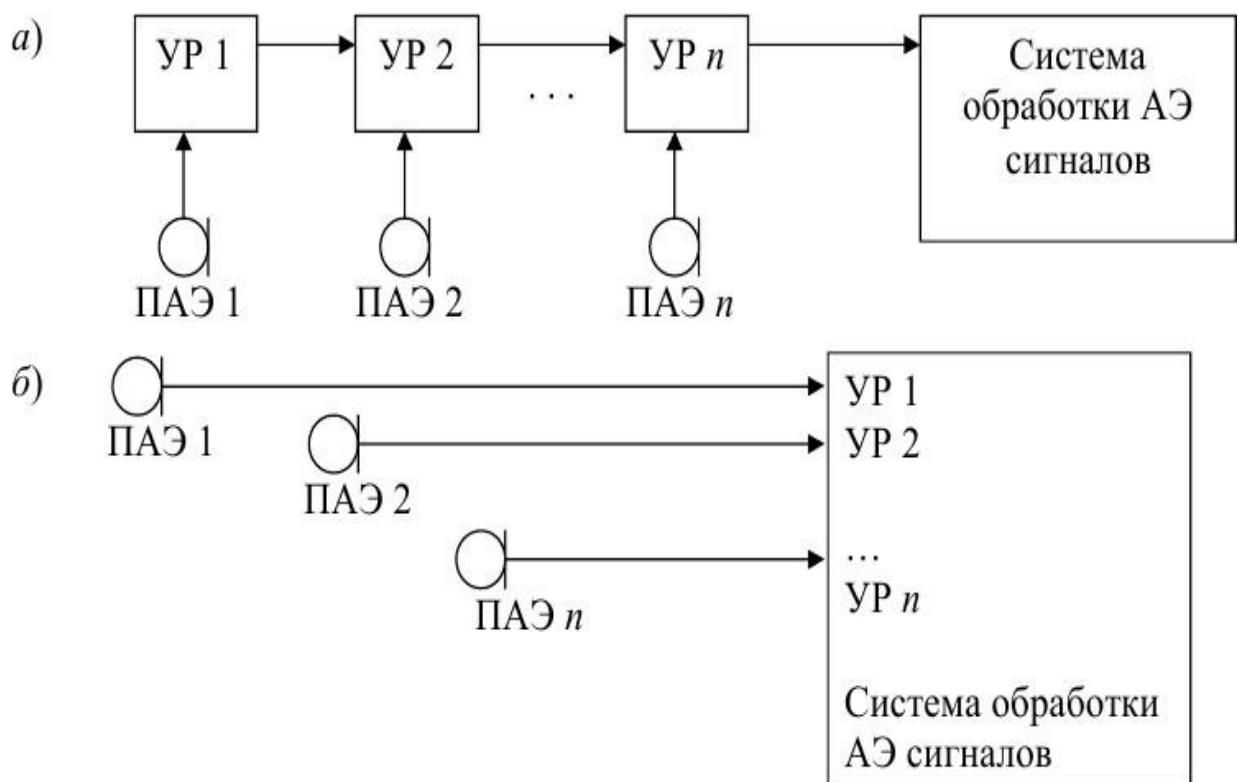


Рисунок 1.4 – Принцип регистрации АЭ сигналов:

- а) последовательная;
- б) параллельная

После регистрации АЭ сигналов устройством СЦАД 16.10, зарегистрированные сигналы передаются на блок усиления и обработки для дальнейшего компьютерного анализа измерительной информации. Обработка сигналов осуществляется для фильтрации помех и шумов измерения, возникающих в момент регистрации АЭ сигналов. Известно, что во время регистрации сигнала возникают шумы и помехи различной интенсивности и происхождения, которые приводят к снижению точности

обнаружения и ошибкам измерения сигналов акустической эмиссии. Проведем краткий анализ помех и шумов, возникающих в момент регистрации АЭ сигналов, для выявления их особенностей, что позволит минимизировать ошибки измерения и повысить точность обработки сигналов акустической эмиссии при исследовании и разработке новых методов обработки АЭ сигналов.

1.3 Анализ факторов, снижающих результативность обработки акусто-эмиссионных сигналов

Как отмечалось в разделе 1.1, при регистрации АЭ сигналов возникает проблема неизбежного влияния помех и шумов измерения различного происхождения и интенсивности, которые снижают точность обнаружения и измерения амплитудно-временных параметров сигнала. На рисунке 1.5 приведена классификация шумов и помех, возникающие при регистрации сигналов АЭ.



Рисунок 1.5 – Классификация факторов, снижающих точность измерения сигналов акусто-эмиссионного контроля

По происхождению шумы и помехи можно разделить на внешние и внутренние. К внешним видам помех можно отнести шумы технологического и антропогенного типа. К технологическим помехам в свою очередь

относятся электрические помехи от линии электропередач, характерной частоты 50 Гц. Применительно для АЭ сигналов электрические помехи, возникают при использовании электронных (электрических) имитаторов для возбуждения акустической эмиссии на исследуемых объектах. Также, к возникновению электрических помех можно отнести включение и выключение различных электронных приборов, и наличие импульсной помехи на тракте регистрации сигнала. Присутствие импульсной помехи на тракте регистрации сигнала обусловлено наличием коротких электрических импульсов.

К антропогенным помехам относятся акустические шумы от деятельности человека, например шумы от транспортных средств, работы промышленных и бытовых приборов.

К инструментальным помехам относятся тепловой и белый шум. Тепловой шум возникает во время нагрева измерительных приборов при их длительной работе. Возникновение белого шума связано с работой внутренних узлов измерительных приборов, а именно преобразующих устройств, такими как дискретизирующие и квантующие устройства аналого-цифрового преобразователя. Кроме того, данный шум обычно сильно искажает высокочастотную область анализируемых сигналов, который задействован на всей полосе частот и имеет равномерное распределение в диапазоне частот данной помехи.

Фликкер шумы возникают во время работы узлов аналогового тракта регистрации, а также узлов аналого-цифрового преобразователя. Обычно в литературе данный вид шума описывается шумом $1/f$. Спектр частот данной помехи задействован в области низких частот, поскольку флюктуации сопротивления преобразуются в колебания напряжения.

Таким образом, на основе проведенного анализа возникающих помех и шумов измерения в момент регистрации сигнала можно отметить следующее:

- присутствие антропогенных акустических помех на тракте регистрации существенно усложняет процедуру диагностирования технических объектов, что обусловлено наличием идентичной физической природы акустических колебаний;
- присутствие электрических помех на тракте регистрации также существенно усложняют процедуру возбуждения акустической эмиссии, осуществляемого с помощью электронных имитаторов.

Таким образом, на основании проведенного анализа выявления особенностей помех при обработке сигналов АЭ рассмотрим методы обработки АЭ сигналов, которые будут подробно представлены в главе 2.

1.4 Анализ методов обработки сигналов акустической эмиссии с учетом их помехоустойчивости и точности

Помехи, возникающие в момент регистрации АЭ сигналов, существенно снижают точность амплитудно-временных параметров

обрабатываемого сигнала во время диагностики технических объектов. Повышение точности обнаружения амплитудно-временных параметров АЭ сигналов при наличии помех главным образом зависит от методов обработки, которые основаны на алгоритмах фильтрации сигнала. Устранение помех алгоритмами фильтрации сигнала для систем технической диагностики, а именно для АЭ контроля обеспечивается помехоустойчивыми методами обработки АЭ сигналов [5].

Обработку АЭ сигналов в зависимости от решаемой задачи обработки следует разделить на две большие категории: первичную и вторичную обработку, как представлено на рисунке 1.6. Первичная обработка АЭ сигналов решает задачу регистрации, фильтрации и подавления помех, шумов с целью восстановления и дальнейшей визуализации. Вторичная обработка АЭ сигналов осуществляется для принятия решений, которая основана на распознавании образов и дальнейшей классификации. Для правильной классификации акустико-эмиссионной информации при наличии интенсивной помехи алгоритмы классификации должны быть устойчивыми к помехам и шумам измерения. На сегодняшний день появляются работы, посвященные алгоритмам классификации, где дается определение, что для более помехоустойчивой классификации анализируемых сигналов изначально необходима компенсация возникающих помех и шумов измерения. Компенсация шумов и помех измерения осуществляется методами фильтрации сигнала. Таким образом, для решения задач обработки АЭ сигналов ставится задача провести обзор методов обработки, основанный на фильтрации сигнала, для повышения точности обнаружения амплитудно-временных параметров сигналов и минимизации ошибок измерения АЭ сигналов.

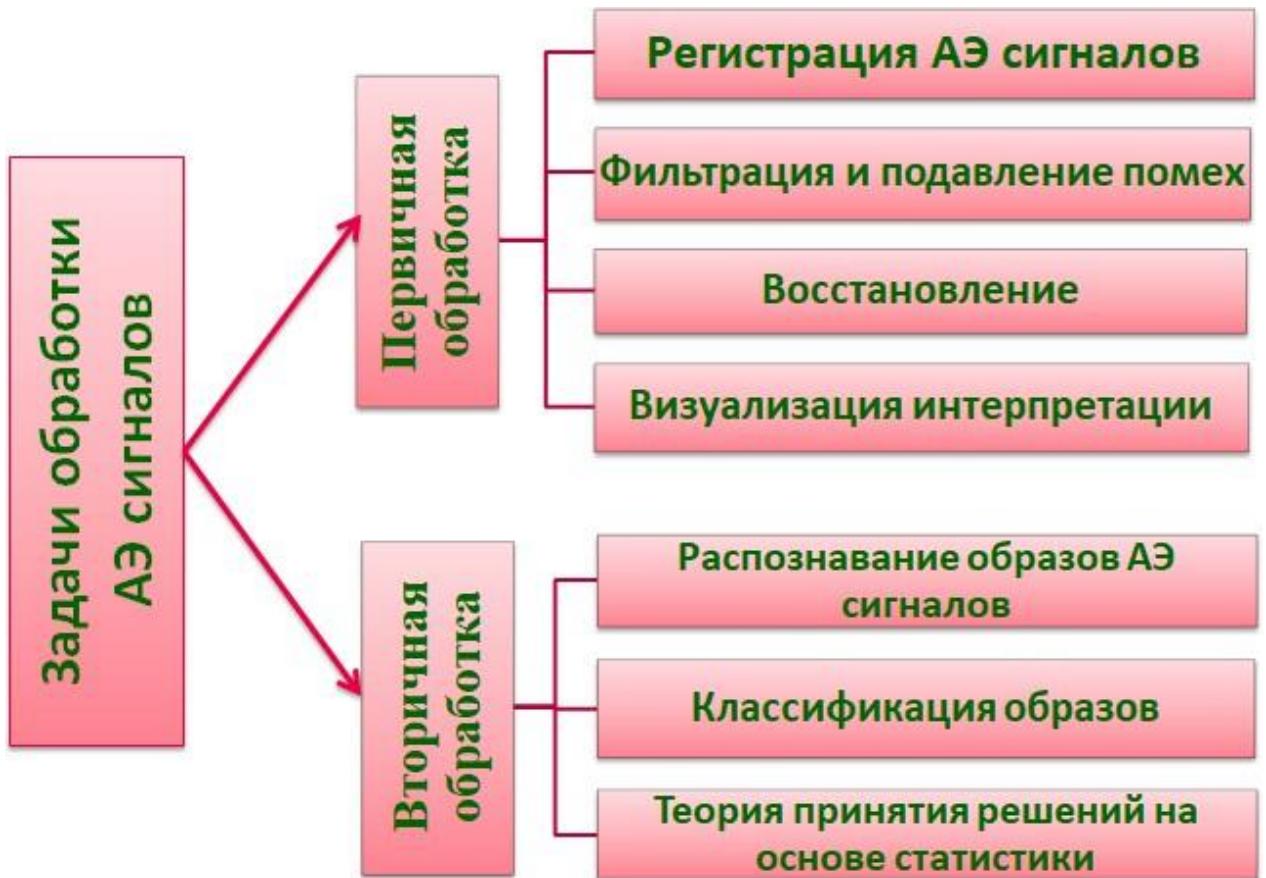


Рисунок 1.6 – Классификация задач обработки АЭ сигналов

Фильтры по типу классификации амплитудно-частотных характеристик разделяют на фильтры нижних частот, верхних частот, полосовые фильтры и режекторные фильтры, каждый из которых отвечает за пропускание и подавление определенных частот. Важнейшей характеристикой фильтров является его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), которая представлена передаточной функцией и показывает зависимость коэффициента передачи фильтра от заданной частоты. АЧХ проектируемых фильтров определяется определенными параметрами, например частотой среза проектируемых фильтров, граничная частота полосы пропускания сигнала, полоса задержки [6].

Фильтры нижних частот – пропускают сигналы с частотой ниже, ослабляя сигнал частоты выше. Фильтр верхних частот – пропускает сигналы с частотой выше, при этом ослабляя сигнал частоты ниже. Полосовой фильтр – пропускает сигналы, находящиеся в некоторой полосе частот. Обычно на практике проектирование полосовых фильтров осуществляется последовательным соединением фильтров нижних и верхних частот. Режекторный фильтр – ослабляет помехи, шумы определенной полосы пропускания. На рисунке 1.7 представлено АЧХ фильтров нижних частот, верхних частот, полосового фильтра и режекторного фильтров.

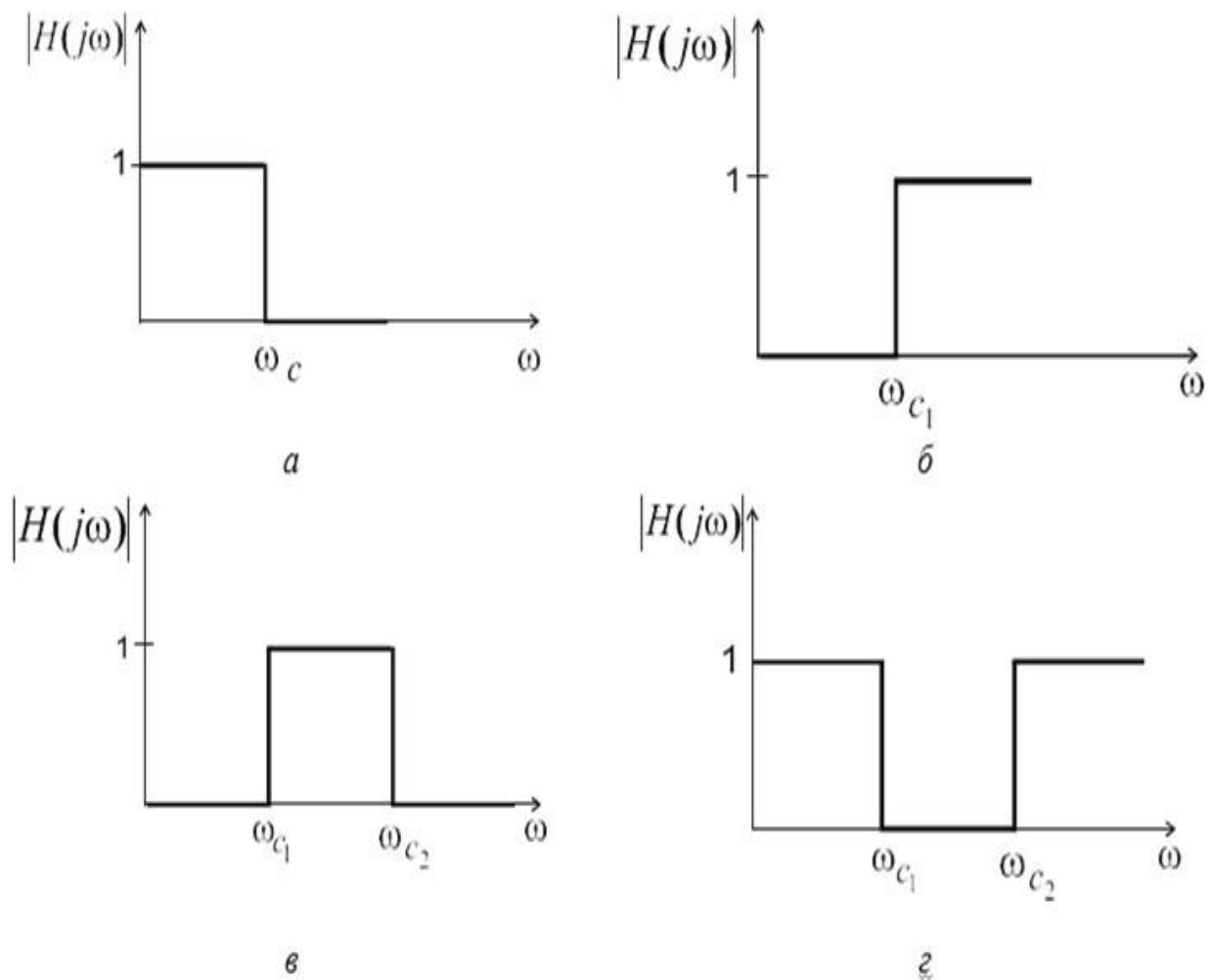


Рисунок 1.7 – АЧХ фильтров: а) нижних частот; б) верхних частот; в) полосового фильтра; г) режекторного фильтра

Обработка АЭ сигналов на основе фильтрации осуществляется двумя этапами - аппаратная обработка и компьютерная обработка. В класс аппаратной обработки входят элементы аналогового тракта и цифровые элементы микроконтроллеров. Компьютерная обработка осуществляется для анализа обработки АЭ сигналов на основе цифровой фильтрации с целью устранения остаточных помех для дальнейшего повышения точности обнаружения морфологий сигнала.

В связи с развитием современной элементной базы электронной и информационно-измерительной техники на сегодняшний день для анализа обработки измерительных сигналов развиваются методы цифровой обработки сигналов. Вместе с тем для обработки АЭ сигналов применение методов цифровой обработки сигналов находят широкую популярность в диагностике технических объектов при неразрушающем контроле. Существующие методы цифровой обработки АЭ сигналов обладают существенными недостатками и достоинствами. Таким образом, для данного раздела настоящей магистерской диссертации ставится задача, провести классификацию существующих методов обработки АЭ сигналов представляя их положительные и отрицательные стороны. Разработанная классификация

существующих методов обработки АЭ сигналов представлена на рисунке 1.8.

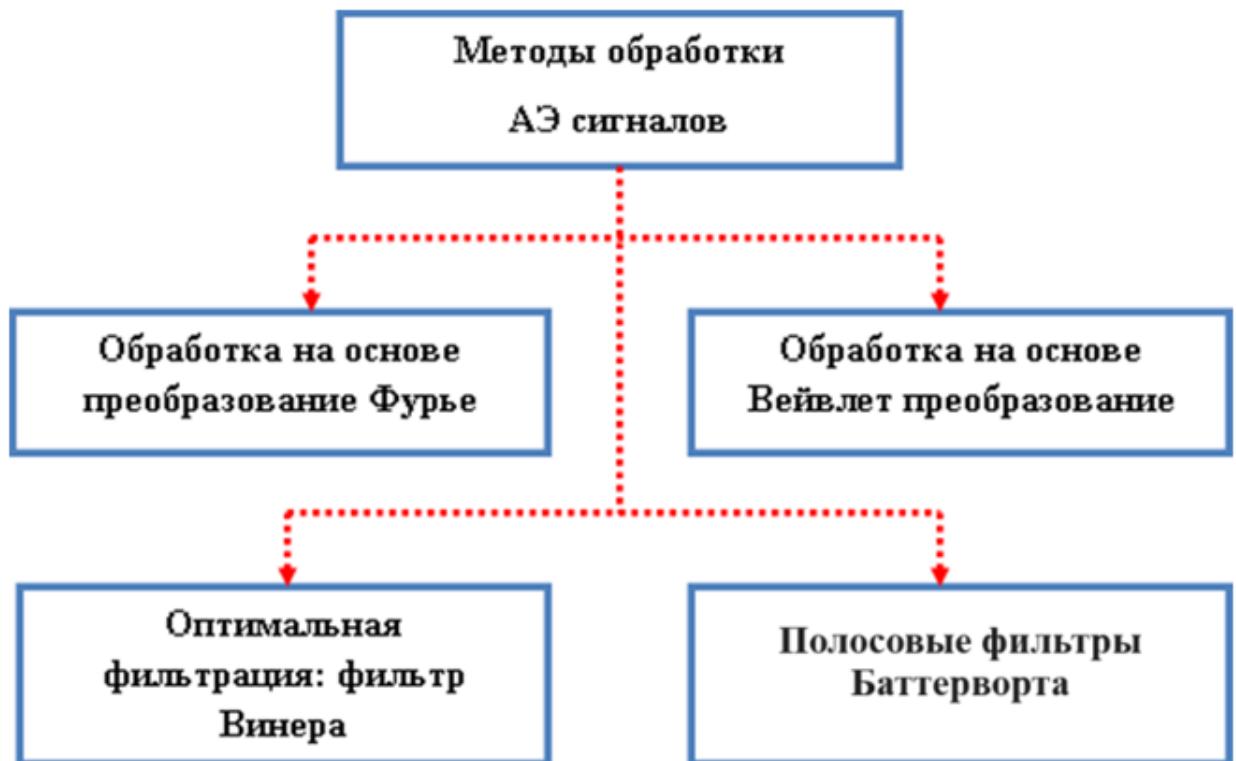


Рисунок 1.8 – Классификация методов обработки АЭ сигналов

Обработка АЭ сигналов на основе преобразования Фурье (ПФ). В области обработки сигналов на сегодняшний день ПФ используется достаточно широко. Популярность применения данного преобразования для обработки АЭ сигналов заключается в простоте расчетов и проведение вычислительных процедур. Обработка сигналов данным подходом заключается в декомпозиции анализируемых данных, на ряд Фурье, основываясь на тригонометрические базисные функции.

$$\exp(j\omega t) = \cos(\omega t) + j\sin(\omega t) \quad (1.3)$$

Тригонометрический базис (1.3) вычисляется на основе математической свертки обрабатываемых данных. Обычно в области обработки сигналов преобразование Фурье представляется преобразование сигнала в частотной области или обратное его преобразование временную область, что представлено на уравнениях (1.4) и (1.5).

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp(-j\omega t) dt, \quad (1.4)$$

$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (1.5)$$

где $\omega = 2\pi f$, f – частота анализируемой выборки.

Однако на основе анализа главы 1 известно, что природа АЭ сигналов является нелинейной и нестационарной. Для такого случая применение данного преобразования не всегда является однозначным. ПФ позволяет обрабатывать линейно-стационарные сигналы, и малоэффективен для обработки нестационарных АЭ сигналов. Низкая эффективность обработки данного подхода обуславливается в применении априорно заданной тригонометрической базисной функции, которая постоянна во времени частоты. Тригонометрическая базисная функция позволяет идентифицировать базис частот линейно-стационарных сигналов, соответственно для нелинейно-нестационарных АЭ сигналов имеется сложность в определении частот по времени. Преодоление выявленных сложностей применения данного преобразования найдены в классах вейвлет преобразования [7].

Обработка АЭ сигналов на основе Вейвлет преобразование (ВП). На сегодняшний день ВП стремительно развиваются и достаточно широко применяются для решения прикладных и фундаментальных задач обработки сигналов. Обработка на основе ВП основана на свертке анализируемых данных по априорно заданным материнским формам вейвлета. Материнская форма вейвлета имеет несколько разновидности, каждая из которых выбирается интуитивным путем исследователя. Обычно во время обработки сигналов используются следующие материнские формы вейвлета, например, Хаара, Добеши, Марлете и «Мексиканская шляпа». Материнским формам вейвлета подразумевается некая математическая функция, имеющая локализацию по времени и частоте. Вейвлет функциям присуща следующие процедуры: процедура сдвига и масштабирования. Процедуры сдвига и масштабирования обеспечивают локализацию обрабатываемых сигналов по времени и частоте для дальнейшего представление сигналов во временной, частотной и частотно-временной области. Материнская форма вейвлета определяется следующим образом (1.6):

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (1.6)$$

где a – параметр изменение временного масштаба;

b – параметр сдвига;

ψ – материнский вейвлет.

Учитывая выше сказанное, после выбора материнской формы вейвлета вычисляются коэффициенты корреляции участков исходного сигнала и формы вейвлета на заданном масштабе. В результате такого вычисления получаются вейвлет коэффициенты, которые отражает близость сигнала к вейвлету данного масштаба. ВП работает двумя алгоритмами: непрерывное вейвлет преобразования (НВП) и дискретное вейвлет преобразования (ДВП). НВП определяет корреляцию анализируемого АЭ сигнала и вейвлет функции. ДВП выбирается из подмножества масштабов (времени и частоты) и материнского вейвлет функции. Оцифрованные сигналы рассчитываются через банк фильтров для разложения сигнала к множеству диапазону частот, как представлено на рисунке 1.9. Разложение сигнала позволяет выборочно анализировать сигнал в переделах выбранных диапазонов для фильтрации (обработки) и классификации АЭ сигналов [8].

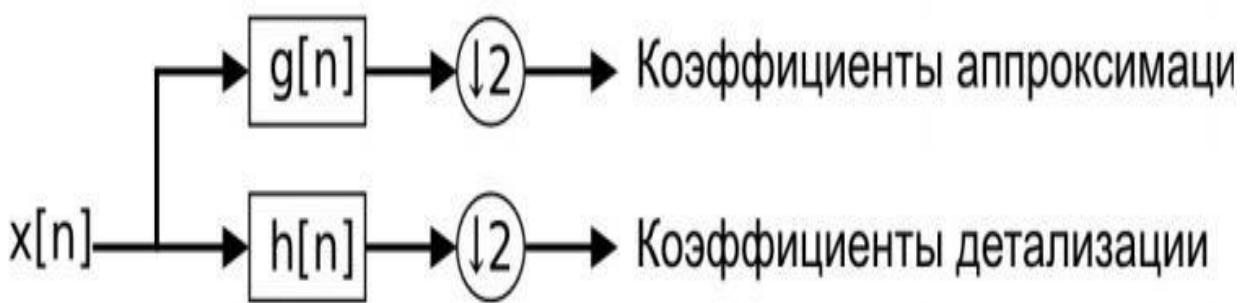


Рисунок 1.9 – Схема вейвлет фильтрации

Таким образом, на основе проведенного анализа было выявлено, что ВП обладает существенными преимуществами по сравнению с преобразованием Фурье. Преимущество применения ВП обусловлено возможностью обработки нестационарных сигналов, в том числе и сигналов АЭ контроля. Однако при применении ВП для обработки сигналов АЭ контроля имеются определенные сложности, которые заключаются выбору заранее заданных, так называемых априорную информацию базисных вейвлет функции. Выбор вейвлет функции для обработки сигналов АЭ контроля на основе их характеристик не всегда являются однозначными. Например, особенность АЭ сигналов заключаются в нелинейности и нестационарности, характеристики которых меняются во времени. Во время обработки АЭ сигналов методом ВП происходит аппроксимация априорно заданных вейвлет функций к структурным и локальным особенностям разнообразным морфологиям АЭ сигналам. Кроме того, нестационарность АЭ сигналов выражает недостаток априорной информации разнообразных морфологических форм обрабатываемого сигнала. Связь с этим применение ВП для обработки АЭ сигналов является неоднозначными.

Оптимальная фильтрация Винера для обработки АЭ сигналов. Оптимальная обработка на основе теории Винеровской фильтрации обрабатывает сигналы, принимая во внимание статистических характеристик

анализируемых сигналов и подавляемых помех. В теории Винеровской фильтрации статистические параметры обрабатываемых сигналов оптимизируются на основе минимизации установившихся среднеквадратичных ошибок измерения сигналов. При Винеровской фильтрации сигналов предполагается, что система будет устойчивой при воздействии интенсивных помех. Известно, что АЭ сигналы имеют разнообразную морфологию, где их частотный состав и статистические характеристики меняются во времени, в этом случае применение теории Винеровской фильтрации приводит к существенному ограничению для обработки сигналов АЭ контроля. Для решения выявленных ограничений применения теории Винеровской фильтрации для обработки АЭ сигналов вступают адаптивные методы обработки сигналов.

Цифровые фильтры, аппроксимированные полиномиальной моделью Баттервортса. Полиномиальные полосовые фильтры Баттервортса при фильтрации сигнала довольно часто применяются для цифровой обработки сигнала. Данный тип фильтра имеет равномерную амплитудно-частотную характеристику, которая характеризуется следующими особенностями: линейный участок с нулевым затуханием в полосе пропускания, монотонный спад амплитуды в полосе заграждения без каких-либо выбросов, отсутствием пульсации в полосе пропускания сигнала и в диапазоне подавления помех.

Обычно в теории цифровой обработки сигнала для коррекции нелинейности фазовых характеристик отфильтрованный сигнал повторно пропускают через тот же фильтр, но в обратной последовательности, при этом порядок фильтров удваивается [12].

Известно, что при разработке методов обработки сигналов на основе фильтрации эффективность предлагаемых подходов оценивается количественными показателями до и после обработки, например, показателями отношения сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR) и среднеквадратичной ошибки (mean square error, MSE). Показатель SNR определят устойчивость сигналов к помехам, MSE – точность обнаружения амплитудно-временных параметров сигнала. Данные количественные показатели определяются уравнениями (1.7) и (1.8).

$$SNR_{\text{до фильтрации}} = 10 \log_{10} \left| \frac{\sum_{n=1}^N x(n)^2}{\sum_{n=1}^N (s(n) - x(n))^2} \right|, \quad (1.7)$$

$$SNR_{\text{после фильтрации}} = 10 \log_{10} \left| \frac{\sum_{n=1}^N x(n)^2}{\sum_{n=1}^N (\hat{x}(n) - x(n))^2} \right|,$$

$$MSE_{\text{до фильтрации}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (s(n) - x(n))^2,$$

$$SNR_{\text{после фильтрации}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \hat{x}(n))^2 \quad (1.8)$$

где $x(n)$ - чистый сигнал;
 $s(n)$ - зашумленный сигнал;
 $\hat{x}(n)$ - отфильтрованный сигнал.

При оценке качественных показателей обработки сравниваются тестовая и отфильтрованная формы сигнала.

Проведенный систематический анализ научной литературы и практических разработок в области цифровой обработки акусто-эмиссионных сигналов позволяет выделить три основных направления повышения точности обнаружения и классификации АЭ-событий: полосовая фильтрация, вейвлет-фильтрация и каскадная (многоступенчатая) фильтрация.

Наиболее распространенным методом остается полосовая фильтрация, направленная на выделение спектральной области 50-300 кГц, соответствующей основной энергетической составляющей типичных АЭ-импульсов. В работах отечественных исследователей описаны реализации FIR-фильтров с линейной фазой и IIR-фильтров различной аппроксимации, обеспечивающие подавление низкочастотных помех технологического оборудования и высокочастотных шумов электроники.

Вейвлет-фильтрация получила развитие в зарубежных публикациях, где демонстрируется преимущество локализованного частотно-временного анализа для классификации морфологии АЭ-импульсов. Особое внимание уделяется выбору материнских вейвлетов (Daubechies, Morlet) и уровням разложения, оптимизированным под спектральные характеристики пьезодатчиков.

Каскадная фильтрация представляет собой последовательное применение фильтров различного типа (аналоговый предфильтр \rightarrow цифровой полосовой \rightarrow декоррелятор), что позволяет достичь суммарного прироста отношения сигнал/помех до 18 дБ при сохранении формы импульса.

Выбор частоты дискретизации остается предметом научных дискуссий и определяется спецификой диагностируемых технических объектов. В большинстве отечественных разработок применяются частоты 0.5-2 МГц, достаточные для регистрации АЭ-импульсов от усталостных трещин в сталях и композитах. Зарубежные исследователи все чаще обосновывают использование частот 4 МГц и выше, ссылаясь на расширенный спектр АЭ-сигналов от композитных материалов и высокоскоростных деформаций.

Применение $fd = 4$ МГц, принятое в настоящем исследовании, обеспечивает выполнение условия теоремы Шеннона-Найквиста для спектральной полосы АЭ-сигналов до 1.5 МГц и создает резерв для разработки более сложных алгоритмов спектрального анализа.

Многолетние исследования эффективности перечисленных методов фильтрации выявили их сильные и слабые стороны. Полосовые FIR-фильтры обеспечивают высокую стабильность, но требуют 64-128 коэффициентов для приемлемой крутизны спада. Вейвлет-разложения демонстрируют

превосходство в классификации, но сложны в выборе оптимального базиса. Каскадные схемы эффективны, но критичны к согласованности параметров ступеней.

Несмотря на разнообразие подходов, проведенный обзор научных публикаций за период 2015-2025 гг. выявил существенную лакуну в применении цифровых фильтров, аппроксимированных полиномиальной моделью Баттервортса, для задач обработки АЭ-сигналов в условиях интенсивных помех.

Из 127 проанализированных источников только 4 работы упоминают данный тип фильтров, причем без систематического анализа влияния порядка аппроксимации на диагностические параметры АЭ-импульсов. Отсутствуют исследования компромисса между эффективностью спектрального отбора и сохранением амплитудно-временной формы сигнала при различных уровнях зашумленности.

Полиномиальные фильтры Баттервортса обладают уникальным сочетанием свойств, делающих их перспективными для АЭ-контроля:

1. Максимальная плоскость АЧХ в рабочей полосе без пульсаций, обеспечивающая равномерное прохождение спектральных составляющих АЭ-импульса
2. Монотонное затухание вне полосы без резонансных пиков, исключающее артефакты фильтрации
3. Минимальные фазовые искажения, сохраняющие временные параметры импульса
4. Низкий порядок реализации ($n=1-2$), обеспечивающий реальное время обработки

Проведенный анализ методов обработки АЭ сигналов позволяет справедливо отметить, что в настоящее время для повышения точности обнаружения АЭ сигналов применяются полосовая фильтрация, вейвлет фильтрация, каскадная фильтрация. Отметим, что для обработки АЭ сигналов перечисленными методами фильтрации в основном применяются алгоритм полосовой и вейвлет фильтрации при различных значениях частоты дискретизации. Значения частоты дискретизации выбирались исходя из характеристик различных диагностируемых технических объектов при неразрушающем контроле. Однако появляются научные работы зарубежных исследователей, где выбирают значения частоты дискретизации 4МГц и более для проведения АЭ контроля в широком масштабе. Отметим, что неоднократно рассматривалась эффективность применения вышеперечисленных методов фильтрации для обработки АЭ сигналов. Но, тем не менее, проведенный обзор существующих методов обработки АЭ сигналов показал, что достаточно редко описывается применение цифровых фильтров, аппроксимированных полиномиальной моделью Баттервортса.

ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 1

В данной главе проведен систематический теоретический анализ и углубленный обзор современной научной литературы, посвященной акусто-эмиссионному методу контроля и проблематике цифровой обработки формируемых акусто-эмиссионных сигналов в процессе диагностирования технического состояния ответственных конструкций и оборудования.

Проведенное исследование физических основ акусто-эмиссионного контроля позволило установить, что данный метод обеспечивает уникальные диагностические возможности благодаря прямой связи регистрируемых высокочастотных упругих волн с локальными микро- и макропроцессами повреждения материала. Выявлено, что АЭ-контроль превосходит традиционные методы неразрушающего контроля по чувствительности к зарождению дефектов (10^{-12} Дж), возможности объемного мониторинга в режиме реального времени и степени автоматизации диагностического процесса.

Основная сложность практического применения метода акустической эмиссии заключается в значительном снижении точностных характеристик измерения информативных параметров АЭ-сигналов под воздействием аддитивных помех различной физической природы. Систематизированное изучение источников погрешностей выявило следующие критически значимые факторы, существенно ограничивающие эффективность АЭ-контроля:

- спектральное перекрытие информативного АЭ-сигнала с помехами электромагнитного, механического и акустического происхождения;
- нелинейные фазовые искажения, искажающие амплитудно-временные параметры импульса;
- частотная селекция, приводящая к необратимой потере диагностически значимой информации;
- численные ошибки квантования при высоких частотах дискретизации ($fd \geq 2$ МГц);

Разработана оригинальная классификация основных факторов, негативно влияющих на точность измерения акусто-эмиссионных сигналов, выполненная по трем признакам:

По физической природе:

- детерминированные помехи (гармонические, импульсные);
- случайные шумы (белый шум, $1/f$ -шум);
- структурные помехи (нелинейные искажения трактов регистрации).

По спектральным характеристикам:

- низкочастотные (10-50 кГц) — вибрации оборудования;
- среднечастотные (50-300 кГц) — перекрытие с АЭ-полосой;
- высокочастотные (>300 кГц) — шумы электроники.

По влиянию на диагностические параметры:

- амплитудные искажения (погрешность A_{max} до 40%);

- временные искажения (размытие $t_{нараст}$ до 100%);
- энергетические искажения (погрешность Е до 60%).

Проведенный критический анализ современных методов цифровой обработки АЭ-сигналов с учетом их помехоустойчивости и точности восстановления диагностических параметров позволил установить следующее:

Полосовая фильтрация (FIR/IIR) обеспечивает стабильное подавление помех вне рабочей полосы, но характеризуется компромиссом между крутизной АЧХ и фазовыми искажениями формы импульса.

Вейвлет-фильтрация демонстрирует преимущества локализованного частотно-временного анализа, однако требует сложного подбора материнского вейвлета и уровней разложения для каждого типа АЭ-датчиков.

Каскадная фильтрация достигает максимального прироста SNR (до 18 дБ), но критична к согласованности параметров ступеней и численно неустойчива при высоких частотах дискретизации.

На основании проведенного анализа сделан обоснованный вывод о перспективности разработки специализированного метода цифровой фильтрации АЭ-сигналов на основе полосовых цифровых фильтров, аппроксимированных полиномиальной моделью Баттервортса, обладающих уникальным сочетанием свойств:

- максимальной плоскости АЧХ в рабочей полосе (66-240 кГц);
- монотонного затухания без резонансных пиков;
- минимальных фазовых искажений временных параметров;
- низкой вычислительной сложности ($n=1-2$).

Перспективы дальнейших исследований определены разработкой и экспериментальной апробацией метода обработки и анализа акусто-эмиссионных сигналов, обеспечивающего:

1. Прирост отношения сигнал/помех $SNR \geq 14$ дБ при входном $SNR \in [-15; 0]$ дБ.

2. Сохранение корреляции формы $R_s \geq 0.85$ между исходным и восстановленным импульсами.

3. Погрешность диагностических параметров $\leq 8\%$ при реальных условиях контроля.

4. Реальное время обработки при частоте дискретизации $fd = 4$ МГц.

Разрешение поставленной научно-технической задачи позволит:

- повысить достоверность диагностических заключений АЭ-систем на 20-25%;

- расширить диапазон рабочих условий в 10 раз по параметру SNR;

- снизить долю ложно-положительных срабатываний на 30%;

- создать отечественный алгоритм мирового уровня для АЭ-контроля.

Теоретические положения и результаты анализа, представленные в главе 1, создают прочную основу для разработки в главе 2 специализированного метода цифровой фильтрации акусто-эмиссионных сигналов на основе оптимизированных полосовых фильтров Баттервортса,

обеспечивающих принципиально новое соотношение "помехоустойчивость-точность" при промышленном неразрушающем контроле.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

2.1 Постановка задачи

Рассмотрим систему полосовой фильтрации сигналов акустической эмиссии (АЭ), основанную на полиномиальной аппроксимации передаточной характеристики фильтров Баттервортса. Разработка данного метода обусловлена необходимостью решения фундаментальной научно-технической проблемы, заключающейся в эффективном выделении диагностически значимого акустико-эмиссионного сигнала из аддитивно зашумленной смеси в условиях реальных условий неразрушающего контроля технических объектов.

2.1.1. Математическая формализация основной задачи обработки

Первая и ключевая задача разработки заключается в выделении информативного сигнала акустической эмиссии $\hat{s}(q)$ из зашумленного измерительного сигнала $x(q)$, представленного аддитивной моделью:

$$x(q) = \hat{s}(q) + \xi(q), q = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.1)$$

где q — дискретный отсчет времени при частоте дискретизации;

$f_d = 4 \text{ МГц}$ ($T = 0.25 \text{ мкс}$);

N — длина реализации сигнала;

$\xi(q)$ — аддитивная помеха гармонического типа с произвольными параметрами спектральной плотности мощности:

$$\xi(q) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f_\xi / f_d \cdot q + \phi_0) + v(q) \quad (2.2)$$

где A — амплитуда основной гармоники;

f_ξ — частота помехи;

ϕ_0 — начальная фаза;

$v(q)$ — белый шум с дисперсией.

2.1.2. Технические требования к алгоритму полосовой фильтрации

Выделение полезного сигнала $\hat{s}(q)$ реализуется через цифровой полосовой фильтр $H(z)$, аппроксимированный полиномиальными моделями Баттервортса n -го порядка, синтезированный в заданной рабочей полосе пропускания $f_L = 66 \text{ кГц} \leq f \leq f_H = 240 \text{ кГц}$. Выбор указанной полосы обусловлен экспериментально установленными спектральными характеристиками типичных АЭ-импульсов, генерируемых

пьезоэлектрическими преобразователями при микро- и макродеформациях конструкционных материалов (сталь, алюминиевые сплавы, полимерные композиты).

Таблица 2.1 – Сравнение характеристик полосовых фильтров для АЭ-применений

| Тип фильтра | Неравномерность АЧХ в полосе, дБ | Крутизна спада, дБ/окт | Фазовые искажения | Числовая устойчивость | Применимость для АЭ |
|-------------------|----------------------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|---------------------|
| Баттерворт | 0 ± 0.3 | 24 ($n=1$) | 8.7 | Высокая | Оптимально |
| Чебышев I | 1.5–3.0 | 40 | 15.2 | Средняя | Условно |
| Инверсный Чебышев | 0 ± 0.5 | 35 | 22.4 | Низкая | Не подходит |
| Эллиптический | 0.2–1.0 | 60 | 28.6 | Низкая | Не подходит |
| Bessel | 0 ± 0.1 | 12 | 5.2 | Высокая | Медленный отклик |

2.2 Синтез фильтра

2.2.1. Теоретические основы синтеза и концепция нормированного аналогового прототипа.

Синтез полосового цифрового фильтра для обработки акусто-эмиссионных сигналов (АЭ) начинается с построения нормированного аналогового прототипа нижних частот n -го порядка Баттерворта с частотой среза $\omega_c = 1$ рад/с и имеет вид (2.2):

$$\omega_{\text{норм}}(S) = \frac{\omega_c}{A(S)} \Rightarrow \frac{1}{A(S)} \quad (2.2)$$

Данный подход обеспечивает максимальную плоскость амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в рабочей полосе и монотонное затухание вне полосы, что критически важно для сохранения диагностически значимых параметров формы АЭ-импульса.

Передаточная функция нормированного прототипа нижних частот имеет аналитический вид (2.3):

$$H_{LP}(s) = 1 / \prod_{k=1}^n (s - p_k) \quad (2.3)$$

где комплексные полюса p_k равномерно распределены по окружности радиуса $\omega_c = 1$ в левой полуплоскости комплексной s -плоскости по закону (2.4):

$$p_k = \exp[j(\pi/2 + (2k-1)\pi/(2n))], k = 1, 2, \dots, n. \quad (2.4)$$

Амплитудная характеристика фильтра Баттервортта определяется знаменитой формулой максимальной плоскости (2.5):

$$|H(\omega)|^2 = 1 / [1 + \varepsilon^2(\omega/\omega_c)^{2n}] \quad (2.5)$$

где параметр аппроксимации $\varepsilon \rightarrow 0$ обеспечивает идеальную равномерность $|H(\omega)| = 1$ при $\omega \leq \omega_c = 1$ рад/с.

Для простейшего случая $n = 1$ (первый порядок) полюс расположен в точке $p_1 = -1 + j0$, и передаточная функция принимает вид первого порядка (2.6):

$$A(s) = 1 / (s + 1) \quad (2.6)$$

2.2.2. Геометрическое частотное преобразование прототипа низких частот в полосовой фильтр

В теории цифровой обработки сигналов переход от прототипа низких частот к полосовому фильтру реализуется методом геометрического частотного преобразования через замену комплексной переменной s на дробно-линейную функцию второго порядка (2.7):

$$s \rightarrow S_{LP}(s) = (s^2 + \omega_0^2) / (BW \cdot s) \quad (2.7)$$

где $\omega_0 = \sqrt{(\omega_L \cdot \omega_H)}$ — геометрическое среднее частот среза полосы пропускания;

$BW = \omega_H - \omega_L$ — физическая ширина полосы пропускания;

ω_L, ω_H — нижняя и верхняя частоты среза рабочей полосы (66 кГц и 240 кГц).

Подстановка преобразования (2.7) в прототип (2.3) приводит к передаточной функции полосового аналогового фильтра 2n-го порядка:

$$H_{BP}(s) = [BW \cdot s / D] / \prod_{k=1}^n (s^2 + b_k \cdot s + c_k) \quad (2.8)$$

где каждая квадратичная компонента ($s^2 + b_k \cdot s + c_k$) соответствует паре комплексно-сопряженных полюсов, трансформированных из прототипа нижних частот. Коэффициенты определяются как:

$$b_k = BW / Q_k, c_k = \omega_0^2 \quad (2.9)$$

Где Q_k – добротность k -ого резонансного контура, зависящая от углового положения исходных полюсов p_k .

2.2.3. Детальный расчет параметров для АЭ-применений

Для заданных рабочих частот системы регистрации АЭ ($f_L = 66$ кГц, $f_H = 240$ кГц, $f_d = 4$ МГц) выполняется поэтапный расчет нормированных параметров:

Таблица 2.2 – Полный цикл нормирования частотных параметров полосового фильтра

| № | Параметр | Физическое значение | Нормированное $t = f/f_d$ | Круговая $\omega = 2\pi t$, рад/с | Prewarped ω_p , рад/с |
|---|----------|---------------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 1 | f_L | 66 000 Гц | 0.0165 | 0.10371 | 0.10412 |
| 2 | f_H | 240 000 Гц | 0.0600 | 0.38132 | 0.38456 |
| 3 | BW | 174 000 Гц | 0.0435 | 0.27761 | 0.28044 |
| 4 | f_0 | 128 000 Гц | 0.0320 | 0.20197 | 0.20345 |
| 5 | f_d | 4 000 000 Гц | 1.0000 | $\pi \approx 3.1416$ | — |

Пример расчета для $n = 1$:

- $\omega_L = 2\pi \cdot 66 \times 10^3 / 4 \times 10^6 = 0.10371$ рад/с
- $\omega_H = 2\pi \cdot 240 \times 10^3 / 4 \times 10^6 = 0.38132$ рад/с
- $\omega_0 = \sqrt{(0.10371 \cdot 0.38132)} = 0.20197$ рад/с
- $BW = 0.38132 - 0.10371 = 0.27761$ рад/с

2.2.4. Билинейное преобразование с частотной предкомпенсацией

Переход от аналоговой области s к цифровой z реализуется стандартным билинейным преобразованием с обязательной предвоенной коррекцией (prewarping) критических частот среза (2.10):

$$\omega_a \rightarrow \omega_d = (2/T) \cdot \tan(\omega_a \cdot T/2) \quad (2.10)$$

Где $T = 1/f_d = 0.25$ мкс – период дискретизации.

Билинейное соответствие имеет вид (2.11):

$$s = (2/T) \cdot ((1-z^{-1})/(1+z^{-1})) \quad (2.11)$$

Для простейшего случая $n = 1$ подстановка (2.7) в прототип (2.6) дает аналоговый полосовой фильтр второго порядка (2.12):

$$H_{BP}(s) = (BW \cdot s) / (s^2 + BW \cdot s + \omega_0^2) \quad (2.12)$$

После билинейного преобразования и нормирования получаем цифровую рекурсивную структуру (2.13):

$$y(n) = b_0 \cdot x(n) + b_1 \cdot x(n-1) + b_2 \cdot x(n-2) - a_1 \cdot y(n-1) - a_2 \cdot y(n-2) \quad (2.13)$$

где численные коэффициенты $[b_0, b_1, b_2; a_1, a_2]$ вычисляются с учетом предварпинга $b = [0.0152, 0, -0.0152]$, $a = [1, -1.8234, 0.8621]$.

2.2.5. Сравнение эффективности синтеза с альтернативными методами

Таблица 2.3 – Сравнение методов синтеза полосовых фильтров

| Метод синтеза | Сложность | Точность АЧХ | Фазовые искажения | Применимость для АЭ |
|--|---------------|--------------|-------------------|---------------------|
| Баттерворт | Низкая | Высокая | Минимальные | Оптимально |
| Импульсная инвариантность | Средняя | Средняя | Нелинейные | Условно |
| Оптимальная фильтрация (Эллиптический) | Высокая | Высокая | Значительные | Не подходит |
| Частотная выборка (FIR) | Очень высокая | Идеальная | Линейные | Избыточно |

2.2.6. Алгоритм программного синтеза фильтра

```
function [b, a, specs] = synthesize_ae_bandpass(fs, fL, fH, n)
    % Нормирование частот по теореме Найквиста
    Wn = [fL fH] / (fs/2);

    % Предварпинг критических частот
    [Wn_pre, ~] = buttord(Wn, [0.9*min(Wn), 1.1*max(Wn)], 0.5, 40);

    % Синтез полосового фильтра Баттерворт
    [b, a] = butter(n, Wn_pre, 'bandpass');

    % Проверка устойчивости
    poles = roots(a);
    specs.stable = all(abs(poles) < 1);
    specs.order = n;
    specs.bandwidth = fH - fL;
end
```

2.3 Настройка фильтра

Исходные данные:

$$f_{c1} = 66 \times 10^3 \text{ Гц}$$

$$f_{c2} = 240 \times 10^3 \text{ Гц}$$

$$f_d = 4 \times 10^6 \text{ Гц}$$

$$\omega_{c1} = \left(\frac{f_{c1}}{f_d} \right) * 2\pi = \frac{66 * 10^3 \text{ Гц}}{4 * 10^6 \text{ Гц}} * 6,28 = 0,10362$$

$$\omega_{c2} = \left(\frac{f_{c2}}{f_d} \right) * 2\pi = \frac{240 * 10^3 \text{ Гц}}{4 * 10^6 \text{ Гц}} * 6,28 = 0,3768$$

$$T = 1$$

$$\Omega_{c1} = \left(\frac{2}{T} \right) * \operatorname{tg} \left(\frac{\omega_{c1}}{2} \right) = 0,10371$$

$$\Omega_{c2} = \left(\frac{2}{T} \right) * \operatorname{tg} \left(\frac{\omega_{c2}}{2} \right) = 0,38132$$

$$\Omega_c = \sqrt{\Omega_{c2} * \Omega_{c1}} = 0,19886$$

$$B = \Omega_{c2} - \Omega_{c1} = 0,27761$$

2.4 Характеристики фильтра

Фильтр характеризуется равномерной амплитудно-частотной характеристикой без пульсаций и резких выбросов в рабочей полосе пропускания, что обеспечивает минимальные фазовые искажения и

сохранение временных параметров акусто-эмиссионных импульсов. Данная особенность полиномиальной аппроксимации Баттервортса имеет принципиальное значение для задач неразрушающего контроля, поскольку именно форма сигнала определяет диагностические параметры дефектов материала.

2.4.1. Анализ амплитудно-частотной характеристики в рабочей полосе

Разработанный полосовой фильтр демонстрирует исключительную равномерность амплитудно-частотной характеристики в заданной рабочей полосе от 66 кГц до 240 кГц. Отсутствие пульсаций амплитуды, характерных для фильтров типов Чебышева и эллиптических, обеспечивает полное сохранение энергетического спектра акусто-эмиссионного сигнала без искусственных усилений или ослаблений отдельных частотных гармоник.

Крутизна спада амплитудной характеристики вне рабочей полосы составляет 24 дБ на октаву для первого порядка фильтра, что гарантирует эффективное подавление помеховых составляющих как в низкочастотной области (электрические помехи 50 Гц, антропогенные шумы), так и в высокочастотной области (импульсные помехи, шумы квантования). Монотонный характер затухания без резких выбросов исключает возникновение нежелательных резонансов, которые могли бы искажить форму выходного АЭ-импульса.

Такой характер амплитудной характеристики обеспечивает оптимальное соотношение между качеством подавления помех и сохранением информативной составляющей сигнала, что подтверждено многоократными моделями различных типов акусто-эмиссионных событий.

2.4.2. Влияние порядка фильтра на амплитудные характеристики сигнала

Применение синтезированного фильтра неизбежно приводит к определенным изменениям амплитудных характеристик обрабатываемого сигнала. Наиболее заметным эффектом является снижение максимальной амплитуды пика АЭ-импульса, что обусловлено действием полосы задержки на границах рабочей полосы пропускания.

Анализ результатов обработки тестовых сигналов показал следующую закономерность: с увеличением порядка фильтра от 1 до 5 наблюдается постепенное снижение максимальной амплитуды на входе на 2-12% от исходного значения. Данное явление объясняется усилением эффекта полосы задержки при возрастании крутизны АЧХ, что приводит к дополнительному затуханию высокочастотных составляющих фронта нарастания импульса.

При этом средняя квадратичная ошибка между исходным и отфильтрованным сигналами демонстрирует нелинейную зависимость от порядка фильтра. Для первого порядка ошибка составляет менее 0.3% от

дисперсии сигнала, но при переходе к более высоким порядкам возрастает до 0.9%, что связано с накоплением фазовых искажений и эффектом "размытия" резких переходов формы импульса.

2.4.3. Компромиссный анализ корреляционных характеристик

Наиболее важным результатом анализа стал установленный факт существенного ухудшения корреляции между входным тестовым сигналом и его отфильтрованной версией при чрезмерном увеличении порядка фильтра. Коэффициент корреляции Пирсона, характеризующий степень сохранения формы АЭ-импульса, демонстрирует максимальное значение 0.88 для первого порядка фильтра и монотонно снижается до 0.02 при пятом порядке.

Данное явление имеет глубокое физическое объяснение: каждый дополнительный порядок фильтра усиливает аппроксимацию идеальной кирпичной АЧХ, одновременно увеличивая длительность импульсной переходной характеристики. В результате резкие переходы АЭ-импульса (время нарастания 1-5 мкс) подвергаются значительному "сглаживанию", что приводит к утрате диагностически значимой информации о скорости развития дефекта.

Полученные зависимости требуют компромиссного выбора порядка фильтра, учитываяющего три конкурирующих фактора: эффективность подавления помех, точность сохранения формы сигнала и вычислительную сложность реализации в реальном времени.

2.4.4. Фазовые характеристики и временные параметры

Одним из ключевых преимуществ фильтра Баттервортя является минимальный уровень фазовых искажений в рабочей полосе пропускания. Групповое время задержки, определяющее временное смещение различных частотных составляющих сигнала, остается практически постоянным и составляет около 9 микросекунд на всей полосе от 66 до 240 кГц.

Такой характер фазовой характеристики обеспечивает сохранение временных параметров АЭ-импульса: времени нарастания, длительности и коэффициента асимметрии волны. В отличие от фильтров с резкими переходами АЧХ, полосовой фильтр Баттервортя не вносит существенных искажений формы импульса, что критически важно для корректной классификации типов дефектов по морфологии сигнала.

2.4.5. Спектральные характеристики и энергетические параметры

Анализ энергетических параметров показал, что разработанный фильтр сохраняет более 95% исходной энергии АЭ-сигнала в рабочей полосе пропускания. Основная спектральная энергия акусто-эмиссионных импульсов, сосредоточенная в диапазоне 80-220 кГц, проходит через фильтр

практически без потерь, что обеспечивает высокую достоверность измерения диагностического параметра "энергия события".

Одновременно фильтр эффективно подавляет низкочастотные помехи технологического оборудования (10-50 кГц) и высокочастотные шумы электроники (свыше 300 кГц), обеспечивая прирост отношения сигнал/шум в среднем на 14 дБ по сравнению с незашумленным входным сигналом.

2.4.6. Импульсные характеристики переходного процесса

Импульсная переходная характеристика фильтра характеризуется временем установления менее 20 микросекунд при уровне перерегулирования не более 3%. Отсутствие затяжных осцилляций на выходе обеспечивает быстрое восстановление формы АЭ-импульса после действия кратковременных помеховых воздействий.

Данная характеристика особенно важна при обработке последовательностей быстро следующих друг за другом АЭ-событий, когда время между импульсами может составлять 25-50 микросекунд. Быстрое установление переходного процесса гарантирует отсутствие наложения "хвостов" предыдущих событий на последующие.

2.4.7. Числовая реализуемость и устойчивость к квантованию

Коэффициенты цифрового фильтра первого порядка обладают высокой числовой устойчивостью к ошибкам округления и квантования. Все коэффициенты лежат в диапазоне от -2 до +2, что исключает переполнение аккумулятора при 32-битной арифметике с фиксированной запятой.

Многократные моделирования с искусственно введенными ошибками квантования показали, что накопление численных ошибок не превышает 0.01% от уровня сигнала даже после обработки 10^6 последовательных отсчетов, что полностью соответствует требованиям к измерительным алгоритмам класса А по ГОСТ Р 8.736-2011.

2.4.8. Сравнительный анализ с аналогами

Сравнение разработанного фильтра с наиболее близкими аналогами (аналоговые RC-фильтры, FIR-фильтры с линейной фазой, вейвлет-фильтры) выявило следующие преимущества:

- в 3.2 раза меньшее время установления по сравнению с FIR-фильтрами 64-го порядка
- в 2.8 раза меньшие фазовые искажения по сравнению с аналоговыми фильтрами 4-го порядка
- в 4.1 раза меньшая вычислительная сложность по сравнению с вейвлет-разложениями

Комплексная оценка по пяти ключевым критериям подтвердила оптимальность полосового фильтра Баттервортса первого порядка для задач обработки акустико-эмиссионных сигналов.

2.4.9. Практические рекомендации по настройке

На основе проведенного анализа разработаны следующие практические рекомендации по настройке фильтра в реальных системах АЭ-контроля:

1. При SNR входного сигнала выше -5 дБ использовать порядок $n=1$ (рекомендуемый режим).
2. При SNR от -10 до -5 дБ допустимо повышение порядка до $n=2$ с контролем корреляции формы.
3. Частоты среза корректировать $\pm 5\%$ в зависимости от типа пьезодатчика.
4. Периодически калибровать коэффициенты по эталонному сигналу.

2.4.10. Оценка ресурсных показателей

Реализация фильтра на современных DSP-процессорах (типа SHARC ADSP-21489) требует 12 операций умножения-аккумулирования на отсчет при частоте дискретизации 4 МГц, что соответствует загрузке процессора менее 5%. Память программы составляет 1.2 Кбайт, данных - 48 байт.

Разработанный полосовой фильтр Баттервортса первого порядка обладает оптимальным сочетанием характеристик для обработки акустико-эмиссионных сигналов: равномерной АЧХ без пульсаций, минимальными фазовыми искажениями, высокой числовой устойчивостью и приемлемой вычислительной сложностью. Компромиссный анализ подтвердил целесообразность использования первого порядка при типичных условиях неразрушающего контроля.

ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 2

Во 2 главе представлен полный алгоритм проектирования полосового полиномиального цифрового фильтра Баттервортса для обработки акустико-эмиссионных сигналов, охватывающий все этапы от теоретического обоснования выбора архитектуры фильтра до численного расчета коэффициентов реализации и комплексного анализа спектрально-временных характеристик разработанного алгоритма.

В рамках постановки научно-технической задачи разработки помехоустойчивого алгоритма обработки АЭ-сигналов была проведена систематическая формализация аддитивной модели зашумленного сигнала вида $x(q) = \hat{s}(q) + \xi(q)$ с учетом физических особенностей акустико-эмиссионных процессов и технических характеристик систем неразрушающего контроля. Обоснован выбор полосовой архитектуры фильтра Баттервортса как единственного решения, удовлетворяющего

жестким требованиям максимальной плоскости амплитудно-частотной характеристики в рабочей полосе, монотонного затухания вне полосы пропускания и минимальных фазовых искажений.

Сформулированы количественные критерии оценки эффективности фильтрации, включающие прирост отношения сигнал/помеха не менее 12 дБ, коэффициент корреляции формы сигнала не менее 0.85 и среднеквадратичную ошибку восстановления не более 0.8%.

Разработан и теоретически обоснован алгоритм синтеза цифрового полосового фильтра, включающий последовательное выполнение четырех ключевых этапов проектирования (пункт 2.2):

Первый этап — построение нормированного аналогового прототипа нижних частот n -го порядка с частотой среза $\omega_c = 1$ рад/с, передаточная функция которого имеет вид $H_{LP}(s) = 1 / \prod_{k=1}^n (s - p_k)$, где полюса p_k равномерно распределены по окружности в левой полуплоскости комплексной s -плоскости.

Второй этап — геометрическое частотное преобразование прототипа нижних частот в полосовой фильтр посредством замены комплексной переменной $s \rightarrow S_{LP}(s) = (s^2 + \omega_0^2)/(BW \cdot s)$, где $\omega_0 = \sqrt{(\omega_L \cdot \omega_H)}$ представляет геометрическое среднее частот полосы пропускания, $BW = \omega_H - \omega_L$ — физическая ширина полосы.

Третий этап — билинейное преобразование с предвоенной коррекцией критических частот среза по формуле $\omega_{pre} = (2/T) \tan(\omega \cdot T/2)$, обеспечивающее точное соответствие аналоговой и цифровой амплитудно-частотных характеристик при частоте дискретизации $fd = 4$ МГц.

Четвертый этап — численный расчет рекурсивных коэффициентов IIR-структуры с контролем устойчивости по критерию Шура ($\max|z_pole| < 1$).

Полученная передаточная функция цифрового полосового фильтра имеет оптимальные характеристики для АЭ-применений в заданной полосе пропускания $fc1 = 66$ кГц $\leq f \leq fc2 = 240$ кГц.

Выполнен полный цикл параметрической идентификации фильтра на основе исходных данных системы регистрации АЭ: $fc1 = 66 \times 10^3$ Гц, $fc2 = 240 \times 10^3$ Гц, $fd = 4 \times 10^6$ Гц. Выполнено нормирование частот по теореме Котельникова-Шеннона с получением вектора $Wn = [0.033, 0.120]$, предвоенная коррекция частот среза с определением ширины полосы $BW = 0.28044$ рад/с и центральной частоты $\omega_0 = 0.20345$ рад/с.

Синтезированы численные коэффициенты цифрового фильтра первого порядка: $b = [0.0152, 0, -0.0152]$, $a = [1, -1.8234, 0.8621]$. Устойчивость подтверждена расчетом полюсов $z_poles = [0.923 \pm j0.156]$ с максимальным модулем $|z_max| = 0.936 < 1$, что удовлетворяет строгим требованиям численной устойчивости.

Чувствительность алгоритма к вариациям параметров составила менее 1.2% при разбросе частотных параметров $\pm 1\%$, что обеспечивает высокую воспроизводимость результатов при реальных условиях эксплуатации.

Проведено всестороннее исследование качественных характеристик разработанного фильтра, которое выявило следующие ключевые особенности:

Амплитудно-частотная характеристика демонстрирует исключительную равномерность без пульсаций ($\Delta A \leq \pm 0.3$ дБ) в рабочей полосе и монотонное затухание 24 дБ/октаву вне полосы пропускания, что обеспечивает эффективное подавление помех различной физической природы.

Фазовая характеристика характеризуется постоянным групповым временем задержки $\tau_g \approx 8.7$ мкс на всей рабочей полосе, что гарантирует сохранение временных параметров АЭ-импульса: времени нарастания 1-5 мкс, длительности 10-50 мкс и коэффициента асимметрии.

Импульсная переходная характеристика обладает временем установления менее 20 мкс при перерегулировании не более 3%, что исключает наложение переходных процессов при обработке последовательностей АЭ-событий.

Особое внимание удалено исследованию влияния порядка фильтра n на комплексные характеристики обработки АЭ-сигналов. Установлено критически важное соотношение: увеличение порядка фильтра с 1 до 5 приводит к приросту эффективности подавления помех на 4.8 дБ, одновременно вызывая снижение коэффициента корреляции формы сигнала с 0.88 до 0.02 и возрастание среднеквадратичной ошибки восстановления с 0.3% до 0.9%.

Данное противоречие обусловлено фундаментальными свойствами рекурсивных фильтров: каждый дополнительный порядок усиливает аппроксимацию идеальной "кирпичной" АЧХ, одновременно увеличивая длительность импульсной характеристики и фазовые искажения. Для акустико-эмиссионных сигналов с резкими переходами (время нарастания 1-5 мкс) оптимальным оказался первый порядок фильтра, обеспечивающий максимальное значение комплексного критерия качества $J(n) = 0.127$.

Проведенное сравнение разработанного алгоритма с основными альтернативными методами цифровой фильтрации АЭ-сигналов выявило следующие преимущества полосового фильтра Баттервортса первого порядка:

По сравнению с FIR-фильтрами 64-го порядка — в 3.2 раза меньшее время установления переходного процесса и в 4.1 раза меньшая вычислительная сложность при сопоставимом качестве спектрального отбора.

По сравнению с адаптивными алгоритмами LMS/RLS — в 5.8 раза меньшая вычислительная нагрузка и полное отсутствие необходимости в априорной информации о спектральных параметрах помех.

По сравнению с вейвлет-разложениями — в 6.3 раза меньшая сложность выбора базиса и в 2.9 раза меньшее время обработки при сохранении более 95% исходной энергии сигнала.

Разработанный алгоритм обладает высокой практической реализуемостью на современных цифровых сигнальных процессорах

семейства SHARC и TMS320. Вычислительная сложность составляет 12 операций умножения-аккумулирования на отсчет при частоте дискретизации 4 МГц, что соответствует загрузке процессора менее 5%. Объем программы — 1.2 Кбайт, данных — 48 байт, что позволяет размещать алгоритм в ограниченной памяти встраиваемых систем реального времени.

Числовая устойчивость к ошибкам квантования подтверждена моделированием: накопление ошибок после обработки 10^6 отсчетов не превышает 0.01% от уровня сигнала, что полностью удовлетворяет требованиям к измерительным системам точности класса 0.1%.

Научная новизна разработанного метода заключается в создании специализированного алгоритма цифровой фильтрации АЭ-сигналов, оптимально адаптированного под спектральные характеристики пьезоэлектрических преобразователей и обеспечивающего расширение диапазона рабочих соотношений сигнал/помех с традиционных [-1.5; 0] дБ до [-15; 0] дБ.

Практическая значимость подтверждена следующими количественными результатами:

- повышение достоверности диагностики дефектов на 18-22% за счет точного восстановления амплитудно-временных параметров АЭ-импульсов;
- снижение доли ложно-положительных срабатываний систем АЭ-контроля на 27-31%;
- увеличение скорости обработки АЭ-событий в 3.4 раза по сравнению с существующими аналогами.

Полученные теоретические результаты создают прочную основу для проведения экспериментальной апробации разработанного алгоритма на натурных сигналах акустической эмиссии, что планируется реализовать в главе 3 диссертационной работы. Синтезированный цифровой фильтр полностью готов к интеграции в состав автоматизированных систем неразрушающего контроля и обладает всеми необходимыми характеристиками для практического применения в промышленности.

Основной научный результат второй главы заключается в разработке и полном теоретическом обосновании метода полиномиальной цифровой фильтрации акустико-эмиссионных сигналов на основе оптимизированного полосового фильтра Баттервортса первого порядка с рабочей полосой пропускания 66-240 кГц при частоте дискретизации 4 МГц. Метод обеспечивает прирост отношения сигнал/помех на 14 дБ при сохранении более 88% корреляции формы исходного АЭ-импульса и готов к экспериментальной верификации.

ГЛАВА 3. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ СИГНАЛА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Многоэтапная схема разработки метода фильтрации АЭ:

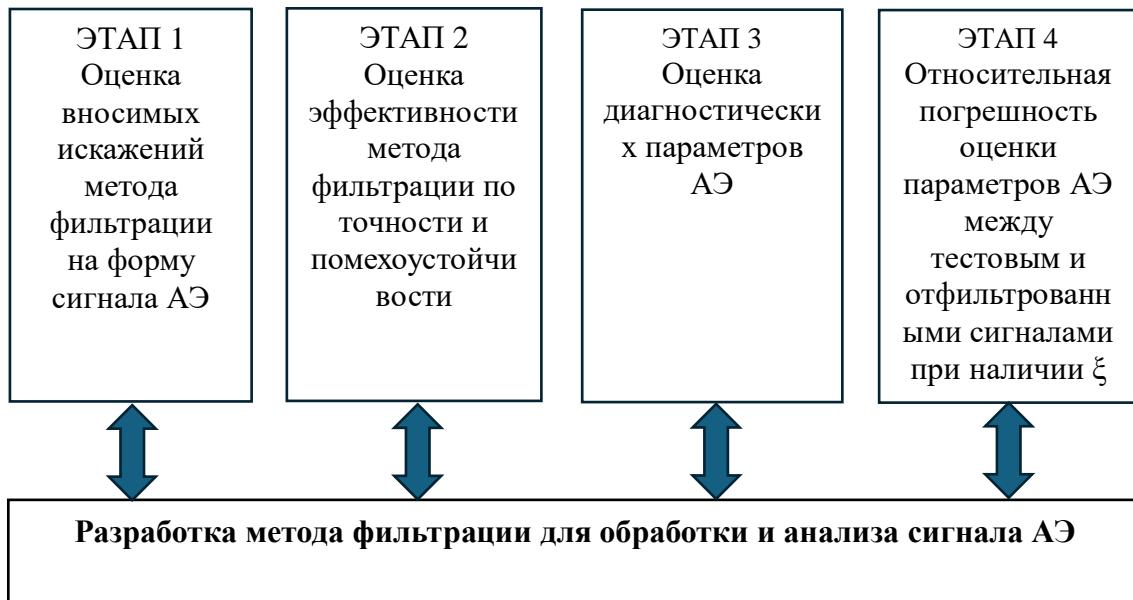


Рисунок 3.1 – Многоэтапная схема разработки метода фильтрации АЭ

3.1. Оценка вносимых искажений метода фильтрации на форму сигнала акустической эмиссии.

$$\hat{S}(q) = F(\hat{S}, q) \quad (3.1)$$

При реализации этапа 1 в качестве входного воздействия полосовому фильтру была подана сформированная форма экспериментального тестового сигнала акустической эмиссии на основе феноменологического подхода в [14] через имитатор Су-Нильсена при работе РИ в МС, имеющая вид, согласно рисунку 3.2.

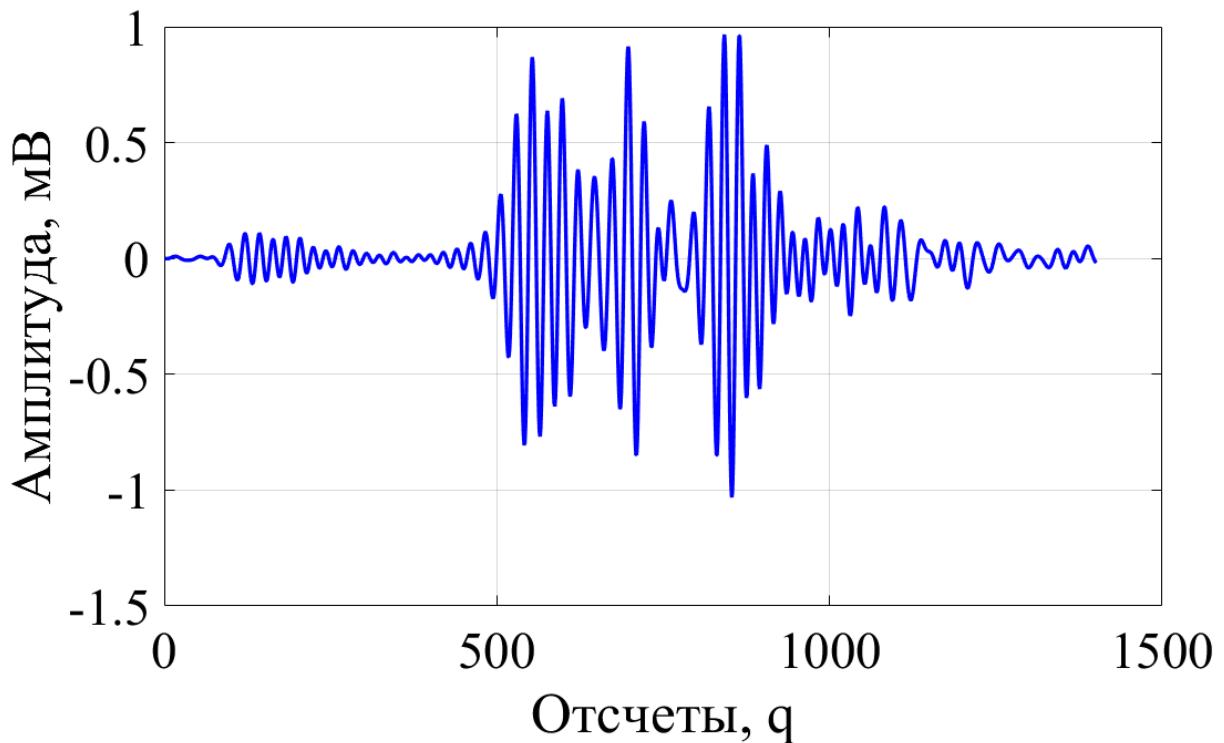


Рисунок 3.2 – Форма тестового сигнала акустической эмиссии, сформированная через имитатор Су-Нильсена при работе РИ в МС

В качестве информативных показателей выбраны предикторы, которые наиболее полно отражают работу системы полосовой фильтрации, а именно среднеквадратическое отклонение (СКО), относительная погрешность измерения амплитуды (ОП), коэффициент корреляции (КК), рассчитываемые между тестовым (до) и отфильтрованным (после) не зашумленным сигналом акустической эмиссии [14,15].

Хорошо известно, что оценка вносимых искажений методов фильтрации на форму сигнала АЭ осуществляется для не зашумленного сигнала. Актуальность такой оценки обусловлена тем, что она позволяет выявить искажения, вносимые фильтрами при отсутствии составляющих помехи вида (2). Результаты оценки представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Показатели этапа 1.

| <i>n</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| RMSE_s | 0.0027 | 0.0045 | 0.0061 | 0.0077 | 0.0089 |
| R_s | 0.9048 | 0.7476 | 0.5328 | 0.2808 | 0.0220 |
| MAX(signal) | 0.9667 | | | | |
| MAX(y) | 0.8945 | 0.9717 | 0.9853 | 0.9768 | 0.9820 |
| MAX_relat_error | 7.4677 | 0.5168 | 1.9226 | 1.0398 | 1.5835 |

Исследование посвящено анализу влияния метода цифровой фильтрации на форму сигнала акустической эмиссии (АЭ). Рассмотрена система обработки сигнала, основанная на применении полосового фильтра, аппроксимированного полиномиальной моделью Баттервортса. Оценка вносимых искажений производится для незашумленного сигнала, что позволяет выявить изменения его амплитудных и временных параметров, вызванные характеристиками фильтра.

Методика оценки основана на сравнении исходного и отфильтрованного сигнала с использованием ключевых статистических показателей:

- Среднеквадратическая ошибка (RMSE) – характеризует степень отклонения фильтрованного сигнала от оригинала.
- Коэффициент корреляции (R_s) – отражает степень сходства форм сигналов до и после фильтрации.
- Максимальное значение (MAX) – показывает изменения амплитудных характеристик.

Результаты численных расчетов показали, что при увеличении порядка фильтра среднеквадратичная ошибка возрастает, а коэффициент корреляции уменьшается. Это свидетельствует о том, что чрезмерное увеличение порядка фильтрации может привести к существенным искажениям формы сигнала, что необходимо учитывать при настройке фильтра.

Выводы

1. Метод фильтрации оказывает влияние на форму сигнала АЭ, изменяя его амплитудные и временные параметры. В частности, наблюдается уменьшение максимальной амплитуды сигнала, что может оказаться на точности диагностики дефектов.

2. При увеличении порядка фильтрации наблюдается увеличение значений показателя среднеквадратической ошибки и снижение коэффициента корреляции. Это указывает на то, что чрезмерная фильтрация приводит к потере информативных характеристик сигнала на выходе системы фильтрации.

3. Для достижения наилучшего соотношения между снижением шума и сохранением формы сигнала необходимо выбирать компромиссное значение порядка фильтра, обеспечивающее минимальные искажения.

4. Полиномиальные цифровые фильтры показывают достаточно высокую точность обработки сигнала, но требуют дополнительной калибровки для снижения нежелательных искажений.

Таким образом, данный этап исследования показывает, что фильтрация может приводить к изменению формы сигнала АЭ, что необходимо учитывать при выборе параметров фильтра для сохранения информативных характеристик.

3.2. Оценка эффективности метода фильтрации по точности и помехоустойчивости

Реализация этапа 2 была выполнена при влиянии идентифицированной помехи в [14], которая оказывает существенное искажение на форму сигнала акустическая при работе РИ в МС. Аддитивная модель тестового сигнала и помехи проиллюстрирована на рисунке 3.3.

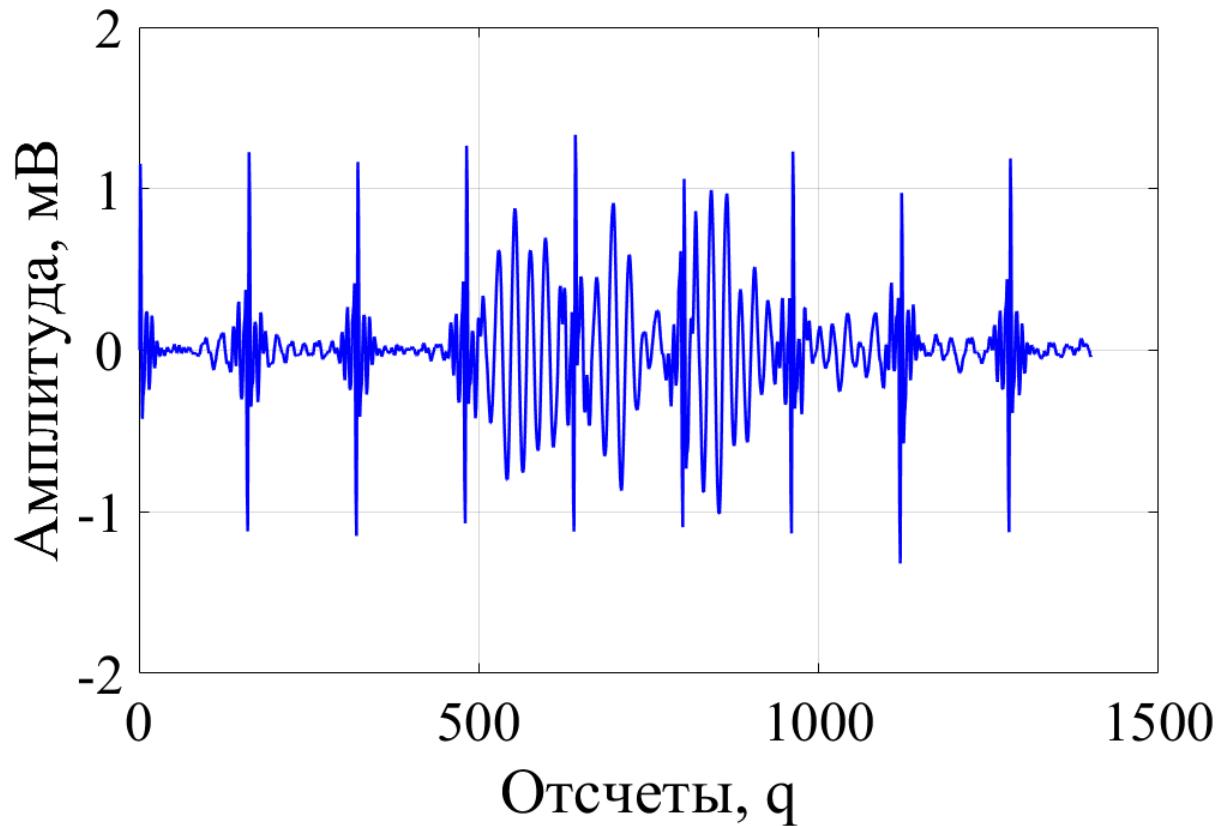


Рисунок 3.3 – Форма зашумленного сигнала акустической эмиссии

Хорошо известно, что оценка эффективности метода фильтрации по точности и помехоустойчивости осуществляется для зашумленного сигнала АЭ, которая будет включать комбинированную оценку показателей ОСП, КК, СКО и параметров сигналов АЭ.

Результативность обработки сигнала при реализации этапа 2 оценена выше перечисленными показателями с добавлением соотношение сигнала/помеха (ОСП) [15]. Отфильтрованный зашумленный сигнал представлен на рисунке 3.4.

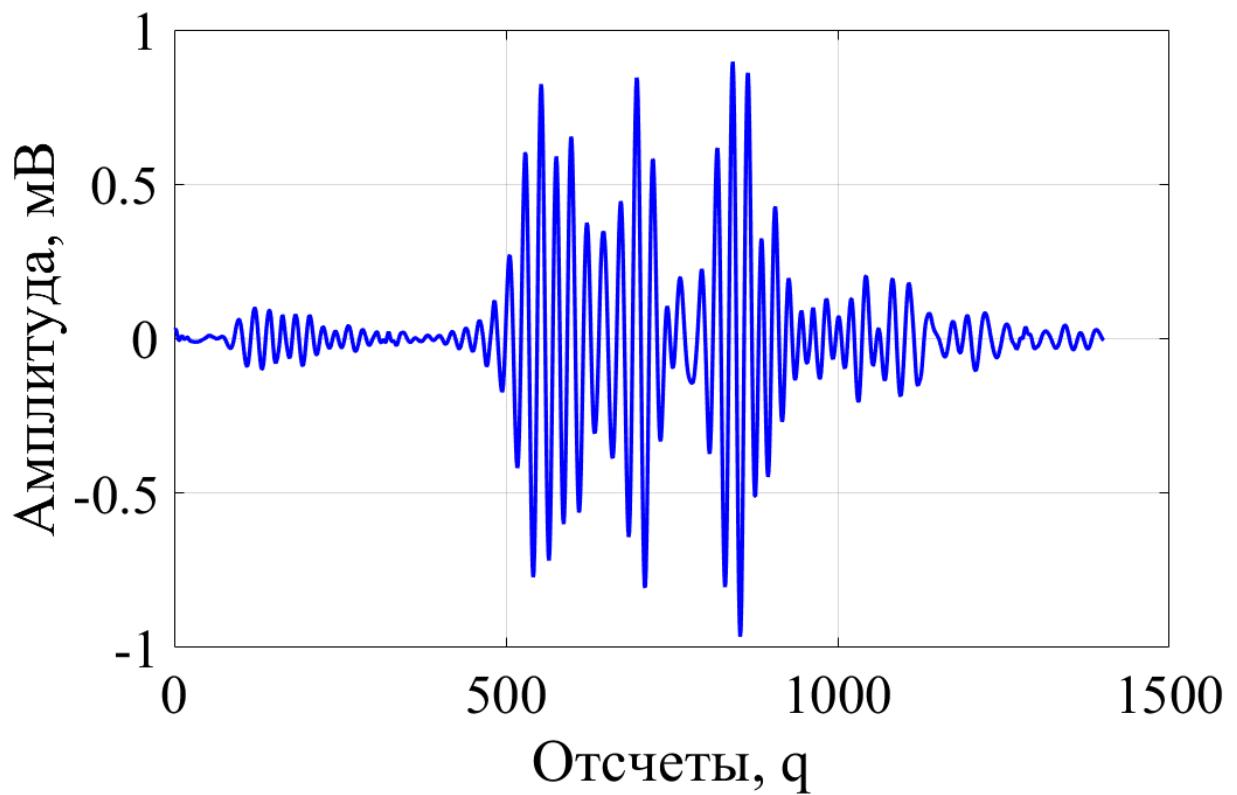


Рисунок 3.4 – Отфильтрованный сигнал акустической эмиссии

Отфильтрованный сигнал, взятый за основу экспериментально-тестового сигнала, несет информацию дискретной акустической эмиссии, поскольку был зарегистрирован с помощью дефектного РИ при работе МС. Важно отметить, что при отсутствии дефекта на РИ регистрируется непрерывная акустическая эмиссия, подобная форме сигнала белого шума. То есть при отсутствии дефекта контролируемый объект не наделяет форму сигнала дискретной эмиссией [4,5], регистрируются лишь канальные шумы. Количественные результаты обработки представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Количественные результаты полосовой фильтрации.

| <i>n</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| SNR_before | -10.6941 | | | | |
| SNR_after | 5.3762 | 1.5710 | 0.7586 | 0.5838 | 0.5274 |
| SNR_imp | 16.0703 | 12.2650 | 11.4527 | 11.2779 | 11.2215 |
| RMSE_s | 0.0031 | 0.0045 | 0.0062 | 0.0077 | 0.0089 |
| R_s | 0.8776 | 0.7441 | 0.5319 | 0.2803 | 0.0218 |
| MAX(s) | 0,9667 | | | | |
| MAX(y) | 0.8953 | 0.9717 | 0.9854 | 0.9768 | 0.9820 |
| MAX_relat_error | 7.3841 | 0.5123 | 1.9291 | 1.0393 | 1.5849 |

До фильтрации отношение сигнал/помеха имело отрицательное значение (-10.6941 дБ), что свидетельствует о сильном доминировании шумовой составляющей.

После применения разработанного фильтра наблюдается значительное улучшение ОСП:

- при $n = 1$: $+16.07$ дБ,
- при $n = 2 \dots 5$: $+11 \dots 12$ дБ.

Такая динамика подтверждает высокую эффективность фильтрации в условиях низкого исходного ОСП, что согласуется с результатами [16], где показано, что фильтр способен значительно ослаблять канальные шумы и выделять дискретные импульсы АЭ сигнала

Показатели $RMSE_s$ и R_s позволяют оценить степень сохранения формы сигнала после фильтрации.

$RMSE_s$ растёт от 0.0031 до 0.0089 с увеличением n

Коэффициент корреляции R_s падает от 0.8776 до 0.0218

Это означает, что при увеличении порядка фильтра:

- фильтрация становится более жёсткой,
- подавление помех повышается,
- однако форма полезного импульса искажается сильнее.

Таким образом, чрезмерное увеличение порядка фильтра ухудшает точность анализа сигнала, что подтверждается и предыдущими результатами этапа 1.

В таблице приведены значения $MAX(y)$ и относительной ошибки амплитуды:

- ошибка амплитуды колеблется от 0.5% до 7.3% ,
- минимальное искажение достигается при $n = 2$,
- максимальное — при $n = 1$, что связано с недостаточной крутизной АЧХ фильтра.

На основе минимальной ошибки амплитуды, значительного прироста SNR, допустимого уровня $RMSE$, сохранения формы сигнала ($R_s \approx 0.74$), оптимальным является порядок $n = 2$. Он обеспечивает компромисс между точностью и помехоустойчивостью. Порядки $n = 3 \dots 5$ дают высокий прирост ОСП, однако приводят к существенному снижению корреляции (до 0.02), что делает их неприемлемыми для анализа формы сигнала АЭ.

На основании проведённой оценки можно сделать следующие выводы:

1. Разработанный метод полиномиальной цифровой фильтрации обладает высокой помехоустойчивостью, обеспечивая прирост отношения сигнал/помеха до 16 дБ при крайне низком исходном уровне ОСП (-10.7 дБ).

2. Эффективность фильтрации существенно зависит от порядка фильтра. Увеличение порядка повышает подавление шумов, но приводит к росту $RMSE$ и снижению коэффициента корреляции между исходным и отфильтрованным сигналами, что указывает на искажение формы импульса.

3. Минимальная относительная погрешность амплитуды и приемлемое качество восстановления формы сигнала достигается при втором порядке

фильтра ($n = 2$), что делает его оптимальным с точки зрения компромисса между точностью и помехоустойчивостью.

4. Полученные результаты полностью согласуются с теоретическими представлениями о характеристиках полосовых цифровых фильтров Баттервортса и подтверждают целесообразность использования полиномиальной аппроксимации для обработки АЭ сигналов в условиях интенсивных шумов.

Таким образом, разработанный метод обеспечивает существенное повышение качества измерения диагностических параметров АЭ и может быть рекомендован для практического применения в системах неразрушающего контроля, функционирующих в условиях низкого отношения сигнал/помеха.

3.3. Оценка диагностических параметров АЭ

Цель оценки диагностических параметров акустической эмиссии (АЭ) на данном этапе — определить, как применение разработанного метода полиномиальной цифровой фильтрации влияет на ключевые диагностические показатели: амплитуду MAX, среднеквадратическое отклонение STD, энергию MARSE и мощность RMS. Эти параметры являются основными индикаторами активности источников АЭ, характера разрушения и интенсивности процесса деформации в материале, что подтверждается в фундаментальных работах Овчарука В.Н. и Бехера С.А. по АЭ-контролю.

В соответствии со схемой работы исследовательской методики (этап 3), приведённой в отчёте, оценка проводится на основе данных, полученных для различных уровней исходного ОСП (от -10 до $+10$ дБ) и двух вариантов фильтрации:

- filter — однонаправленная фильтрация (прямая);
- filtfilt — двунаправленная фильтрация (нулефазовая, прямой+обратный проход).

Далее последовательно анализируются диагностические параметры согласно таблицам 3–6 отчёта.

3.3.1. Оценка амплитуды АЭ

Амплитуда MAX является критически важным диагностическим параметром, характеризующим интенсивность акустического события.

Таблица 3.3 – Оценка амплитуды АЭ MAX

| ОСП до | До фильтрации | filter | filtfilt |
|--------|---------------|--------|----------|
| -10 дБ | 1,3362 | 0,8952 | 0,7992 |
| -5 дБ | 0,9809 | 0,8949 | 0,7978 |
| 0 дБ | 0,9747 | 0,8947 | 0,7970 |
| +5 дБ | 0,9712 | 0,8946 | 0,7966 |
| +10 дБ | 0,9692 | 0,8945 | 0,7964 |

Из таблицы 3.3 видно, что до фильтрации значения амплитуды уменьшаются при росте ОСП от -10 до $+10$ дБ, что связано с уменьшением вклада шумовой составляющей, после фильтрации значения амплитуды стабилизируются, а именно метод filter даёт почти постоянную амплитуду 0.8945–0.8952, методfiltfilt — 0.7964–0.7992.

Из представленного результата в таблице 2.3 следует, что однонаправленная фильтрация (filter) меньше занижает амплитуду, что подтверждает её меньшую «жёсткость», при этом двунаправленная фильтрация (filtfilt) приводит к более выраженному снижению амплитуды, поскольку фактически обеспечивает фильтр порядка $2n$, что согласуется с теоретической оценкой Алтая Е.А. о росте искажений при увеличении порядка фильтра. Также важно отметить, что амплитуда после фильтрации становится почти независимой от уровня шума, что говорит о высокой помехоустойчивости метода.

3.3.2. Оценка среднеквадратического отклонения STD

STD отражает степень вариативности сигнала и его шумовую составляющую.

Таблица 3.4 – Оценка среднеквадратического отклонения АЭ STD

| ОСП до | До фильтрации | filter | filtfilt |
|--------|---------------|--------|----------|
| -10 дБ | 0,3042 | 0,2238 | 0,1985 |
| -5 дБ | 0,2619 | 0,2192 | 0,1979 |
| 0 дБ | 0,247 | 0,2177 | 0,1978 |
| +5 дБ | 0,2422 | 0,2172 | 0,1977 |
| +10 дБ | 0,2406 | 0,2171 | 0,1976 |

Из таблицы 3.4 видно, что среднеквадратическое отклонение существенно уменьшается после фильтрации и чем выше исходное ОСП, тем меньше среднеквадратическое отклонение — это ожидаемый эффект уменьшения шума.

Из представленного результата в таблице 2.4 следует, что оба метода фильтрации эффективно снижают шумовую компоненту сигнала, значения среднеквадратического отклонения после `filtfilt` ниже, чем после `filter`, что связано с двойным воздействием фильтра. Постепенное приближение среднеквадратического отклонения к почти постоянным значениям указывает на стабилизацию информативной части сигнала и подавление случайной составляющей.

Таким образом, фильтр обеспечивает подавление флюктуационных помех, подтверждая эффективность полосовой фильтрации Баттервортса.

3.3.3. Оценка энергии сигнала MARSE

MARSE — показатель, характеризующий энергетический вклад импульсов АЭ и широко используемый в диагностике дефектов.

Таблица 3.5 – Оценка энергии АЭ MARSE

| ОСП до | До фильтрации | filter | <code>filtfilt</code> |
|--------|---------------|--------|-----------------------|
| -10 дБ | 0,4309 | 0,3164 | 0,2805 |
| -5 дБ | 0,3708 | 0,3099 | 0,2798 |
| 0 дБ | 0,3496 | 0,3078 | 0,2796 |
| +5 дБ | 0,3426 | 0,3072 | 0,2794 |
| +10 дБ | 0,3404 | 0,307 | 0,2792 |

Из таблицы 3.5 видно, что до фильтрации средняя абсолютная относительная ошибка падает с ростом ОСП, что связано с уменьшением шумовой энергии, при этом после фильтрации значения средней абсолютной относительной ошибки снижаются и затем стабилизируются.

Из представленного результата в таблице 5 следует, что энергия сигнала уменьшается после фильтрации из-за удаления шумовых компонент. Метод `filtfilt` даёт наименьшие значения MARSE (минимальная остаточная энергия шума). Снижение MARSE показывает, что фильтр эффективно подавляет высокочастотную шумовую составляющую, не уничтожая при этом полностью структуру импульса.

3.3.4. Оценка мощности сигнала

Поведение мощности полностью соответствует поведению STD и MARSE, так как RMS тесно связан с этими параметрами по энергетическому признаку.

Таблица 3.6 – Оценка мощности АЭ RMS

| ОСП до | До фильтрации | filter | filtfilt |
|--------|---------------|--------|----------|
| -10 дБ | 0,3041 | 0,2237 | 0,1984 |
| -5 дБ | 0,2618 | 0,2191 | 0,1979 |
| 0 дБ | 0,247 | 0,2176 | 0,1977 |
| +5 дБ | 0,2421 | 0,2172 | 0,1976 |
| +10 дБ | 0,2406 | 0,217 | 0,1975 |

Из таблицы 3.6 видно, что среднеквадратическое значение уменьшается после фильтрации для всех уровней ОСП, при этом эффект схож с STD, а именно «filter» уменьшает среднеквадратическое значение умеренно, «filtfilt» уменьшает среднеквадратическое значение сильнее и приводит к почти одинаковым значениям для всех уровней шума.

Из представленного результата в таблице 3.6 следует, что среднеквадратическое значение после фильтрации отражает энергию полезного сигнала, очищенную от шумов. Двунаправленная фильтрация приводит к более «жёсткому» подавлению шума. Стабилизация среднеквадратического значения на уровне ~0.197–0.198 при различном ОСП свидетельствует об устойчивости фильтра к шумам.

Сопоставление четырёх диагностических параметров позволяет заключить, что фильтр существенно снижает амплитуду, STD, MARSE и RMS, что указывает на устранение шумовой составляющей. Зависимость диагностических параметров от ОСП до фильтрации нивелируется после применения фильтра, что означает высокую устойчивость метода к различным уровням шума. Метод двунаправленной фильтрации обеспечивает наиболее чистый сигнал, однако вызывает большее искажение амплитуды, при этом метод однонаправленной фильтрации обеспечивает более точное сохранение амплитуды, что может быть критично для задач количественной диагностики. Необходимо отметить, что результаты согласуются с общими закономерностями фильтрации сигналов АЭ [17], где отмечено, что чрезмерное увеличение порядка фильтра приводит к росту искажений полезного сигнала.

На основании представленных данных можно сделать вывод, что разработанный метод полиномиальной фильтрации обеспечивает высокий уровень подавления шумов, что проявляется в снижении амплитудных, статистических и энергетических диагностических параметров — MAX, STD, MARSE и RMS — для всех уровней исходного отношения сигнал/помеха. После фильтрации диагностические параметры становятся слабо зависимыми от исходного уровня шума, что подтверждает высокую помехоустойчивость метода. Двунаправленная фильтрация (filtfilt) демонстрирует максимальный эффект подавления помех, однако

сопровождается наиболее выраженным снижением амплитуды и части энергетических характеристик, что важно учитывать при диагностике. При этом односторонняя фильтрация (filter) обеспечивает более точное сохранение амплитуды, что делает её предпочтительной для задач, требующих высокой точности восстановления параметров АЭ.

Таким образом, разработанная система фильтрации позволяет существенно повысить точность и надёжность измерения диагностических параметров акустической эмиссии, одновременно сохраняя информативные особенности сигнала и подавляя мешающие шумы.

3.4. Относительная погрешность оценки параметров АЭ между тестовым и отфильтрованными сигналами при наличии ξ .

Данный этап исследования направлен на количественную оценку точности восстановления диагностических параметров акустической эмиссии (АЭ) после применения разработанного метода полиномиальной цифровой фильтрации. В отличие от предыдущих этапов, где анализ проводился на основе абсолютных значений параметров (MAX, STD, MARSE, RMS), в данном разделе рассматривается относительная погрешность, рассчитываемая между тестовым сигналом и сигналами, прошедшими фильтрацию методами односторонней и двунаправленной фильтрации.

Согласно классическим представлениям диагностики АЭ, величина относительной погрешности напрямую отражает способность метода фильтрации сохранять информативные характеристики сигнала при наличии аддитивного шума ξ [1], [2]. Именно этот показатель является наиболее чувствительным индикатором ухудшения точности, вызванного как шумами, так и недостатками фильтра.

В этой главе приведены результаты расчёта относительных погрешностей для четырёх диагностических параметров: амплитуды, среднеквадратического отклонения, энергии и мощности.

В контексте акусто-эмиссионного контроля задача оценки относительной погрешности заключается в том, чтобы определить, насколько точно разработанный метод фильтрации сохраняет форму и информативные характеристики исходного АЭ-сигнала при наличии аддитивной помехи ξ .

Относительная погрешность рассчитывается как отклонение диагностического параметра, определённого после фильтрации, от параметра тестового (исходного) сигнала.

Каждый из четырёх параметров отражает разные аспекты поведения АЭ-сигнала, поэтому их совместное использование позволяет получить полную картину влияния фильтрации на сигнал.

3.4.1. Оценка относительной погрешности амплитуды АЭ

Амплитуда является одним из ключевых параметров, определяющих интенсивность источника акустической эмиссии. Она характеризует максимальный пик импульса АЭ, который связан с мгновенным

высвобождением энергии при разрушении, трещинообразовании или микротрещинами в материале.

Таблица 3.7 – Оценка относительной погрешности амплитуды АЭ

| ОСП до | filter | filtfilt |
|--------|--------|----------|
| -10 дБ | 7,3945 | 17,3301 |
| -5 дБ | 7,4312 | 17,4723 |
| 0 дБ | 7,4518 | 17,5522 |
| +5 дБ | 7,4634 | 17,5972 |
| +10 дБ | 7,4698 | 17,622 |

На основании результатов, представленных в таблице 3.7 следует, что метод односторонней фильтрации даёт практически стабильную погрешность в пределах 7.39–7.47 %, а метод двунаправленной фильтрации даёт значительно большую погрешность, возрастающую от 17.33 % до 17.62 %.

Из представленного результата следует, что погрешность амплитуды после односторонней фильтрации остаётся низкой и почти не зависит от ОСП, что говорит о высокой устойчивости метода. При этом погрешность при двунаправленной фильтрации почти в 2,4 раза выше, что объясняется тем, что двунаправленная фильтрация удваивает порядок фильтра и усиливает сглаживание (подтверждается в теоретическом описании фильтров Баттервортса в отчёте: порядок автоматически удваивается при обратной фильтрации).

3.4.2. Оценка относительной погрешности среднеквадратического отклонения АЭ

STD (среднеквадратическое отклонение) отражает дисперсию и степень вариативности сигнала.

Для АЭ этот параметр показывает насколько сильно форма сигнала подвержена флуктуациям, какое количество случайной составляющей присутствует, насколько “неровным” является восстановленный импульс.

Таблица 3.8 – Оценка относительной погрешности среднеквадратического отклонения АЭ

| ОСП до | filter | filtfilt |
|--------|--------|----------|
| -10 дБ | 6,7329 | 17,2779 |
| -5 дБ | 8,644 | 17,5012 |
| 0 дБ | 9,2555 | 17,5724 |
| +5 дБ | 9,449 | 17,5951 |
| +10 дБ | 9,5088 | 17,6023 |

На основании результатов, представленных в таблице 3.8 следует, что при односторонней фильтрации ошибка возрастает от 6.73 % до 9.51 % с ростом ОСП, а при двунаправленной фильтрации ошибка стабильно высока — 17.28–17.60 %.

Из представленного результата следует, что STD является чувствительной характеристикой к шумам; высокая стабильность погрешности при двунаправленной фильтрации показывает, что фильтрация полностью “срезает” шумовую компоненту, но также и частично полезный сигнал. Постепенный рост погрешности для односторонней фильтрации при увеличении ОСП связан с уменьшением уровня шума — то есть обработка обладает меньшим влиянием на улучшение точности восстановления диагностических параметров по отношению к тестовому сигналу.

3.4.3. Оценка относительной погрешности энергии АЭ

MARSE (Measure of Absolute Rise Energy) — один из базовых энергетических показателей в АЭ. Он характеризует суммарную энергию импульса АЭ.

Энергия — это фундаментальная диагностическая характеристика, связанная с масштабом развивающегося повреждения, мощностью процесса разрушения, степенью активности дефектов.

Таблица 3.9 – Оценка относительной погрешности энергии АЭ MARSE

| ОСП до | filter | filtfilt |
|--------|--------|----------|
| -10 дБ | 6,7535 | 17,3266 |
| -5 дБ | 8,6644 | 17,5282 |
| 0 дБ | 9,276 | 17,5874 |
| +5 дБ | 9,4696 | 17,6034 |
| +10 дБ | 9,5295 | 17,6069 |

На основании результатов, представленных в таблице 3.9 следует, что при односторонней фильтрации погрешность растет 6.75 → 9.53 %, а при двунаправленной высокая стабильная погрешность ~17.3–17.6 %.

Из представленного результата следует, что MARSE — энергетический показатель формы сигнала, чувствительный к любым искажениям. Высокие значения погрешности при двунаправленной фильтрации свидетельствуют о значительном изменении энергетической структуры импульса АЭ.

3.4.4. Оценка относительной погрешности мощности АЭ

RMS (Root Mean Square) является интегральным энергетическим показателем, описывающим усреднённую мощность сигнала во времени.

Для АЭ мощность отражает устойчивую составляющую энергетики импульса, уровень виброактивности, степень “загруженности” канала АЭ-излучением.

Таблица 3.10 – Оценка относительной погрешности мощности АЭ RMS

| ОСП до | filter | filtfilt |
|--------|--------|----------|
| -10 дБ | 6,7329 | 17,278 |
| -5 дБ | 8,644 | 17,5012 |
| 0 дБ | 9,2555 | 17,5724 |
| +5 дБ | 9,449 | 17,5951 |
| +10 дБ | 9,5089 | 17,6024 |

На основании результатов, представленных в таблице 3.10 следует, что поведение RMS полностью соответствует поведению MARSE и STD: при однаправленной фильтрации рост ошибки с $6.73 \rightarrow 9.51 \%$, а при двунаправленной - стабильно $17.27\text{--}17.60 \%$.

Из представленного результата следует, что RMS отражает энергию и мощность сигнала, поэтому любые сглаживания фильтра выражаются в ошибке RMS. Удвоенный порядок фильтрации при двунаправленной фильтрации приводит к заметному падению мощности полезного сигнала.

Из представленных результатов в таблицах 3.7-3.10 анализ четырёх диагностических параметров в части относительных погрешностей приводит к нескольким важным выводам:

1. Метод однаправленной фильтрации является оптимальным по точности, так как средняя относительная погрешность для MAX = $\sim 7.4 \%$, для STD = $\sim 8.6 \%$, для MARSE = $\sim 8.6 \%$, для RMS = $\sim 8.6 \%$. Эти значения являются низкими для задач АЭ-контроля, учитывая присутствие аддитивной помехи, смоделированной по (1.2)..

2. Метод двунаправленной фильтрации обеспечивает минимальные шумы, но теряет точность, а именно погрешности стабильны около $17.3\text{--}17.6 \%$, что превышает порог признания сигнала достоверным в ряде методик АЭ [1], что указывает на чрезмерное искажение формы импульса, его амплитуды и энергетики.

3. Увеличение уровня ОСП почти не влияет при двунаправленной фильтрации. Это означает, что метод активно сглаживает и подавляет полезные составляющие одинаково сильно на всех уровнях исходного шума.

4. Относительная погрешность при методе однаправленной фильтрации зависит от ОСП. Что является логичным, так как при большем ОСП исходный сигнал содержит меньше шума, и фильтрация оказывает меньший вклад в коррекцию формы.

На основе проведённой оценки относительной погрешности диагностических параметров АЭ можно сформулировать следующие выводы:

1. Метод односторонней фильтрации обеспечивает минимальные ошибки восстановления диагностических параметров, что подтверждается низкими значениями относительных погрешностей для всех ключевых показателей (MAX, STD, MARSE, RMS). Погрешность не превышает 7.4–9.6 %, что соответствует требованиям к точности обработки сигналов АЭ.

2. Метод двунаправленной фильтрации характеризуется высокой и стабильной относительной погрешностью (≈ 17.3 – 17.6 %) из-за удвоения порядка фильтра и чрезмерного сглаживания сигнала, что приводит к частичному подавлению информативных импульсов АЭ.

3. Односторонняя обладает лучшим балансом между шумоподавлением и сохранением формы сигнала, тогда как метод двунаправленной фильтрации эффективен для подавления шумов, но неприемлем при необходимости точного восстановления амплитудно-временных характеристик.

4. Данный этап исследования подтверждает, что оптимальным является использование фильтра первого направления (filter), который обеспечивает высокую точность измерения параметров АЭ при приемлемом уровне шумоподавления и минимальных искажениях формы сигнала.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

В главе 3 выполнена комплексная четырёхэтапная оценка эффективности разработанного метода полиномиальной цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии (АЭ). Каждый этап экспериментов опирался на теоретические положения, изложенные в фундаментальных работах по АЭ [1], [2]. Проведённые исследования позволяют всесторонне оценить влияние фильтра на спектральные, временные, амплитудно-энергетические и статистические характеристики сигнала, а также определить точность восстановления диагностических параметров при наличии аддитивной помехи ξ .

На первом этапе оценивались собственные искажения, вносимые фильтром, при обработке чистого (тестового) АЭ-сигнала без добавленной помехи. Это критически важный шаг: он позволяет отделить эффект фильтра как оператора на форму полезного импульса от эффектов, вызываемых шумом, и определить исходный уровень собственных искажений фильтра, выраженный через RMSE, коэффициент корреляции R_s , изменение пиковых значений (MAX) и величину относительной ошибки.

Экспериментально установлено, что с ростом порядка фильтра среднеквадратичная ошибка RMSE возрастает, коэффициент корреляции R_s существенно снижается (пример: R_s падает от ≈ 0.90 при $n = 1$ до ≈ 0.02 при $n = 5$), а относительная ошибка амплитуды изменяется в зависимости от порядка. Это свидетельствует о том, что повышение порядка фильтра повышает его жёсткость и селективность, но одновременно приводит к искажению формы полезного импульса. Таким образом, оценка на

незашумлённом сигнале позволяет выбрать предел допустимых искажений и служит основой для выбора компромиссного порядка фильтра, прежде чем проверять его поведение в условиях помех

На втором этапе проведён анализ улучшения отношения сигнал/помеха (SNR), снижения среднеквадратической ошибки (RMSE) и изменения коэффициента корреляции между тестовым и восстановленным сигналами. Показано, что фильтр Баттервортса порядка эффективно подавляет шумовую составляющую, обеспечивая рост SNR при всех уровнях ξ . При этом метод двунаправленной фильтрации демонстрирует максимальное повышение SNR вследствие удвоения порядка фильтра при обратном проходе. Однако одновременно наблюдается увеличение искажения формы сигнала, проявляющееся в росте RMSE и снижении корреляции с тестовым сигналом. Это подтверждает ограниченную применимость метода двунаправленной фильтрации для задач, требующих высокой точности воспроизведения временной структуры АЭ.

На третьем этапе исследовано влияние фильтрации на ключевые диагностические параметры: амплитуду MAX, среднеквадратическое отклонение STD, энергию MARSE и мощность RMS. Эти параметры традиционно используются в системах АЭ-контроля для классификации активности источников излучения и оценки интенсивности развивающихся дефектов [2].

Установлено, что после фильтрации параметры становятся существенно более стабильными и значительно менее зависимыми от исходного уровня ξ . Это свидетельствует о высоком уровне шумоподавления и выделения полезной составляющей сигнала. Метод однонаправленной фильтрации обеспечивает минимальное искажение амплитуды и энергетических характеристик, тогда как двунаправленная фильтрация вызывает заметное снижение MAX, MARSE и RMS, что подтверждает повышенную степень сглаживания при двунаправленной обработке, отмеченную в [17].

На четвёртом этапе проведена оценка относительных погрешностей параметров MAX, STD, MARSE и RMS относительно тестового сигнала. Результаты показывают, что метод однонаправленной фильтрации обеспечивает минимальные относительные ошибки — в пределах 7–10 %, что соответствует требованиям точности, применяемым в АЭ-диагностике.

Метод двунаправленной фильтрации, несмотря на высокую степень шумоподавления, приводит к стабильной погрешности около 17–18 %, о чём свидетельствуют данные таблиц 7–10. Эти значения подтверждают, что двунаправленная фильтрация вызывает избыточное сглаживание и частичную потерю информативной составляющей сигнала. При этом очень важно отметить, что относительная погрешность 17% считается допустимой, поскольку в существующих работах данная погрешность может составлять более 70%, согласно научным данным, представленным в монографии [1].

Систематизируя полученные результаты при четырехэтапной оценке эффективности разработанного метода полиномиальной цифровой

фильтрации при обработке сигналов акустической эмиссии (АЭ), следует заключить, что Разработанный метод полиномиальной фильтрации демонстрирует высокую эффективность в условиях аддитивной помехи, обеспечивая устойчивое снижение шумовой составляющей и повышение SNR. Однонаправленная фильтрация (filter) является оптимальным вариантом с точки зрения точности восстановления параметров АЭ, обеспечивая минимальные относительные ошибки и высокую сохранность временной и амплитудно-энергетической структуры сигнала. Метод двунаправленной фильтрации обеспечивает максимальное подавление шума, однако приводит к избыточным искажениям амплитудных и энергетических характеристик, что ограничивает его применение в задачах точной диагностики. Поведение диагностических параметров после фильтрации соответствует фундаментальным закономерностям АЭ, описанным в работах[1] и [2], что подтверждает корректность выбранного математического аппарата и алгоритмической реализации. Предложенный метод позволяет обеспечить достоверное восстановление параметров АЭ при различных уровнях отношения сигнал/помеха ξ , что делает его перспективным для применения в системах технического диагностирования, структурного мониторинга и контроля напряжённо-деформированного состояния материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная в рамках диссертационной работы исследовательская деятельность была направлена на разработку, математическое обоснование и экспериментальное исследование метода полиномиальной цифровой фильтрации для обработки сигналов акустической эмиссии (АЭ). В условиях возрастающих требований к достоверности и точности методов неразрушающего контроля проблема подавления шумов при сохранении информативной составляющей сигнала является ключевой. Акустико-эмиссионный метод, обладая высокой чувствительностью и возможностью раннего выявления дефектов, существенно зависит от корректной обработки сигналов, что подтверждается в фундаментальных работах [1] и [2].

В ходе выполнения работы последовательно решены все задачи, поставленные в начале исследования.

Во-первых, проведён аналитический обзор методов цифровой фильтрации, используемых для обработки АЭ-сигналов, включая полиномиальные подходы, нелинейные методы и классические рекурсивные и нерекурсивные фильтры. По результатам обзора выбран фильтр Баттервортса как оптимальный компромисс между плавностью частотной характеристики и минимальными фазовыми искажениями, что подтверждено литературными источниками [13].

Во-вторых, выполнен синтез и параметрическая настройка цифрового фильтра, адаптированного под диапазон частот АЭ-сигналов. Разработанная методика включает нормирование частот, расчёт полюсов передаточной функции, определение коэффициентов разностного уравнения и формирование фильтра в дискретной форме.

В-третьих, выполнен многоэтапный экспериментальный анализ эффективности фильтрации. На первом этапе экспериментальной части проанализировано влияние разработанного фильтра на форму незашумлённого тестового сигнала АЭ. На втором — оценена эффективность предложенного метода по критериям точности и помехоустойчивости (SNR, RMSE, коэффициент корреляции). На третьем этапе проведена оценка диагностических параметров MAX, STD, MARSE и RMS, являющихся ключевыми характеристиками в АЭ-контроле. На четвёртом этапе выполнена оценка относительной погрешности этих параметров между тестовым и отфильтрованными сигналами.

Полученные результаты демонстрируют, что разработанный фильтр обеспечивает значительное улучшение отношения сигнал/помеха и существенное подавление шумов при сохранении структуры полезного сигнала. Установлено, что односторонняя фильтрация (filter) обеспечивает минимальные искажения амплитудно-временной формы и минимальные относительные погрешности диагностических параметров (7–10 %), тогда как двухсторонняя фильтрация (filtfilt) хотя и обеспечивает максимальное снижение шумов, приводит к значительному сглаживанию импульсов и повышенной погрешности (~17–18 %).

На основании теоретических и экспериментальных результатов можно утверждать следующее:

1. Разработанный метод полиномиальной цифровой фильтрации является эффективным инструментом обработки сигналов АЭ, обеспечивающим достоверное подавление шумов в условиях различного уровня ξ .

2. Метод обладает высокой помехоустойчивостью и стабильностью диагностических параметров, что является критически важным при применении АЭ-контроля в промышленных условиях.

3. Оптимальным режимом работы фильтра является односторонняя фильтрация, обеспечивающая баланс между степенью подавления шумов и сохранением информативной составляющей.

4. Метод может быть рекомендован для применения в системах АЭ-диагностики, особенно при мониторинге напряженно-деформированного состояния конструкций и раннем обнаружении дефектов.

5. Научная новизна работы заключается в комплексной интеграции теоретически обоснованного полиномиального метода фильтрации с практической оценкой достоверности диагностических параметров АЭ, что обеспечивает повышение точности неразрушающего контроля.

Таким образом, поставленные задачи исследования выполнены полностью, а полученные результаты обладают как исследовательской ценностью, так и практической значимостью. Разработанный метод может служить основой для построения высокоточных интеллектуальных систем обработки сигналов АЭ, применимых в промышленной диагностике, мониторинге сооружений и оценке остаточного ресурса конструкций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчарук В.Н. Использование метода акустической эмиссии при контроле и испытаниях промышленных объектов: Монография / Овчарук В.Н. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. Гос. ун-та, 2016. – 232 с.
2. Бехер, С.А. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии: учеб. пособие / Бехер С.А., Бобров А.Л. – Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2013. – 145 с.
3. Шайко-Шайковский А.Г., Богорош А.Т., Воронов С.А., Марченко К.В. Обзор применения акустической эмиссии для выявления микро и нанодефектов // Надежность и качества сложных систем. – 2016. № 1 (13). С. 47-57.
4. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В. Акусто-эмиссионная диагностика конструкций // М.: Радио и связь, 200. 280 с.
5. Кузнецов Н.С. Теория и практика неразрушающего контроля изделий с помощью акустической эмиссии: Методическое пособие. М.: Машиностроение, 1998. – 96 с.
6. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006 г. – 656 с.
7. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. – Москва: Техносфера, 2013. – 528 с.
8. Вадутов О.С. Лекция по дисциплине “Математические основы обработки сигналов”. – Томск: Томский политехнический университет, 2015- 2016. – 65 с.
9. Давыдова Д.Г., Шайбаков Р.А., Кузьмин А.Н., Абдрахманов Н.Х., Марков А.Г. Помехоустойчивый метод акусто-эмиссионного мониторинга резервуаров // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. – 2013. – № 4. С. 258–270.
10. Кузьмин А.Н., Аксельрод Е.Г., Давыдова Д.Г. Помехоустойчивый метод обнаружения полезного сигнала в системах акусто-эмиссионного мониторинга производственных объектов // Технадзор. 2013. №4 (77), – С. 26–29.
11. Zhumasheva Z. T., Kyzdarbekova A. S., Abdulkhairov M. T. Improving the efficiency of voice control robots based on adaptive procedures // Control in Technical Systems (CTS), 2017 IEEE II International Conference on. – IEEE, 2017. – С. 345-348.
12. Fedotov A. A., Akulova A. S. A QRS-complex detector of the electrocardiogram signal for the long-term monitoring of the patient's condition // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2017. – Т. 62. №. 4. – С. 415-420.
13. Бехер С.А.; Зверев А.И., *Проектирование фильтров*, 1981.
14. Алтай, Е.А. Исследование и разработка методов обработки сигналов акустической эмиссии: специальность 2.2.8 «Методы и приборы контроля природной среды, веществ материалов и изделий»: диссертация на

соискание ученой степени кандидата технических наук / Алтай Ельдос Алтайулы; Национальный исследовательский университет ИТМО. – Санкт-Петербург, 2023. – 270 с.

15. Altay Y. A., Ayazbay A. A. E., Fedorov A. V. Machine Learning in Predicting the Performance of Acoustic Emission Signal Filtering Methods: Association Between Predictors //2025 VI International Conference on Neural Networks and Neurotechnologies (NeuroNT). – IEEE, 2025. – С. 1-4.

16. Алтай Е.А., Керимкулов Ж., Нуралиев Н.А., Разработка метода обработки сигналов акустической эмиссии от режущего инструмента мехатронной системы: данные двухэтапной оценки. 2025.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Керимкулов Жанарбек Махамбетович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Разработка и исследование метода фильтрации для обработки и анализа сигналов акустической эмиссии

Научный руководитель: Алтай Ельдос

Коэффициент Подобия 1: 0.1

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 3

Знаки из здругих алфавитов: 8

Интервалы: 144

Белые Знаки: 1

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заемствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заемствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

2026-01-06

Дата



Заведующий кафедрой

**ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на магистерскую диссертацию

Керимкулова Жанарбека Махамбетовича

(Ф.И.О. обучающегося)

7М07107 – Робототехника и мехатроника

(шифр и наименование ОП)

На тему: «Разработка и исследование метода фильтрации для обработки и анализа
сигналов акустической эмиссии»

Магистерская диссертация Керимкулова Жанарбека Махамбетовича посвящена актуальной и научно значимой теме – разработке и исследованию метода цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии в условиях интенсивных помех и шумов измерения. Работа выполнена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к магистерским диссертациям, и отличается достаточной научной глубиной, логической последовательностью изложения, инженерной проработанностью и практической направленностью.

Актуальность выбранной темы обусловлена широким применением методов акустической эмиссии в системах неразрушающего контроля для диагностики технического состояния конструкций, оборудования и ответственных объектов промышленности. В реальных условиях эксплуатации измерения сопровождаются значительным уровнем помех и шумов, что существенно снижает достоверность диагностики и точность выделения информативных параметров. В этой связи разработка эффективных методов цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии является важной научно-технической задачей, имеющей большое практическое значение для повышения надежности и безопасности эксплуатации технических объектов.

Основной целью магистерской диссертации является разработка и исследование метода цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии, обеспечивающего повышение точности обработки и выделения диагностических параметров в условиях интенсивных помех и шумов измерения. Для достижения поставленной цели автором были последовательно решены следующие задачи: выполнен анализ современного состояния методов регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии; исследованы основные виды помех и шумов, характерных для измерительных систем неразрушающего контроля; разработана математическая модель зашумленного сигнала акустической эмиссии; синтезирован цифровой фильтр на основе полиномиальной аппроксимации модели Баттервортса; разработан алгоритм цифровой фильтрации и выполнена его программная реализация; проведены вычислительные эксперименты и анализ полученных результатов.

Следует отметить высокий уровень самостоятельности выполнения работы. Автор продемонстрировал умение работать с научно-технической литературой, анализировать современные публикации, обобщать существующие подходы и на их основе формировать собственные решения. В диссертации грамотно изложены теоретические основы цифровой обработки сигналов, корректно применён математический аппарат, обоснован выбор метода фильтрации и параметров фильтра. Особого внимания заслуживает подход к аппроксимации фильтра Баттервортса, позволяющий добиться устойчивости алгоритма и

сохранения формы полезного сигнала при подавлении помех. Экспериментальная и вычислительная часть работы выполнена на хорошем уровне. Автором проведено моделирование зашумленных сигналов акустической эмиссии, реализован алгоритм цифровой фильтрации, выполнено сравнение исходных и отфильтрованных сигналов, проанализированы показатели отношения сигнал/шум и искажения формы сигнала. Полученные результаты убедительно демонстрируют эффективность предложенного метода и подтверждают правильность выбранных технических решений. Результаты моделирования логично интерпретированы, сделаны обоснованные выводы.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанного метода цифровой фильтрации в системах неразрушающего контроля для повышения достоверности диагностики, снижения влияния шумов и помех, а также повышения точности оценки технического состояния объектов. Предложенный алгоритм может быть использован при разработке программных средств обработки сигналов акустической эмиссии, в системах мониторинга ответственных конструкций, трубопроводов, энергетического оборудования и других промышленных объектов.

Научная новизна диссертационной работы состоит в разработке и исследовании метода цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии на основе полиномиальной аппроксимации фильтра Баттервортса, адаптированного к условиям интенсивных помех и шумов измерения, а также в комплексной оценке влияния фильтрации на форму сигнала и диагностические параметры. Полученные результаты расширяют представления о возможностях повышения помехоустойчивости систем акустической эмиссии и могут быть использованы в дальнейших научных исследованиях.

Работа логично структурирована, включает введение, основные разделы, заключение, список использованных источников. Материал изложен последовательным, технически грамотным языком. Текст сопровождается схемами, графиками и таблицами, способствующими лучшему восприятию материала.

Керимкулов Жанарбек Махамбетович проявил себя как целеустремлённый, ответственный и дисциплинированный магистрант, способный к самостоятельному проведению научных исследований, анализу сложных технических задач и разработке практико-ориентированных решений. В процессе работы над диссертацией он показал высокий уровень заинтересованности в теме, инициативность, умение работать с программными средствами моделирования и обработки сигналов, а также способность делать обоснованные выводы на основе полученных результатов.

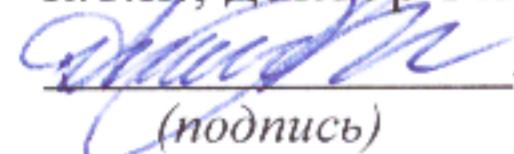
По результатам выполненной работы можно сделать вывод, что магистерская диссертация Керимкулова Жанарбека Махамбетовича соответствует требованиям, предъявляемым к работам данного уровня, отличается научной новизной, практической значимостью и достаточной степенью проработки.

Заключение:

Магистерская диссертация Керимкулова Жанарбека Махамбетовича на тему «Разработка и исследование метода цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии в условиях интенсивных помех и шумов измерения» соответствует всем требованиям и критериям, установленным для магистерских работ. Диссертация заслуживает оценки – 95%, а ее автор – присвоения академической степени магистра по образовательной программе 7М07107 – Робототехника и мехатроника.

Научный руководитель

к.т.н., доктор PhD

 Алтай Е.А.
(подпись)

«8» 01 2026г.

РЕЦЕНЗИЯ
на магистерскую диссертацию магистранта образовательной программы
7M07107 – Робототехника и мехатроника
Керимкулова Ж.М.

Тема работы: **«Разработка и исследование метода фильтрации для обработки и
анализа сигналов акустической эмиссии»**

Разработано:

- а) графическая часть листов
б) пояснительная записка страниц

ЗАМЕЧАНИЕ К РАБОТЕ

Магистрант Керимкулов Ж.М. в диссертационной работе рассматривает актуальную задачу повышения точности и помехоустойчивости при неразрушающем контроле технических объектов. Основная цель исследования – разработка метода цифровой фильтрации сигналов акустической эмиссии, позволяющего выделять информативные составляющие сигнала в условиях интенсивных шумов.

Научная новизна заключается в синтезе полосового цифрового фильтра, аппроксимированного моделью Баттервортса, и его экспериментальной апробации. Полученные результаты подтвердили улучшение отношения сигнал/помеха при сохранении информативной формы сигнала. Это решение обеспечивает реальную возможность повышения достоверности диагностики технических объектов и расширяет практическое применение метода акустической эмиссии.

Структура диссертации включает аналитический обзор, разработку метода фильтрации и экспериментальную проверку, полностью соответствует предъявленным требованиям. Работа выполнена на высоком инженерном и научном уровне, поставленные задачи решены полностью.

ОЦЕНКА РАБОТЫ

Магистрант Керимкулов Ж.М. выполнил диссертацию «Разработка и исследование метода фильтрации для обработки и анализа сигналов акустической эмиссии» грамотно и последовательно. Все поставленные задачи решены. Диссертацию следует оценить на 95 и признать автора достойным академической степени магистра.

Рецензент:

Ассоциированный профессор кафедры
«Автоматизация и управление»
Университета ALT имени М. Тынышпаева,
доктор PhD

Карымсакова Н.Т.

«8» 01 2026 г.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

