

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1205-1215

УДК 620.179.17

Статистическая оценка влияния величины сигнал/помеха на погрешность измерения параметров акустической эмиссии

Алексей Владимирович Федоров¹, Ельдос Алтай^{2✉}, Ксения Андреевна Степанова³,
Дмитрий Олегович Кузиванов⁴

^{1,2,3,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ avfedorov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0612-922X>

² aeldos@inbox.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-3736-0291>

³ ledy.xs93@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1811-3807>

⁴ kuzivanovdmitry@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9661-9614>

Аннотация

Предмет исследования. Современные акустико-эмиссионные диагностические системы и комплексы являются чувствительным инструментом обнаружения развивающихся дефектов при мониторинге технического состояния объектов в условиях эксплуатационных нагрузок на ранних стадиях. Существенное ограничение применения метода акустической эмиссии — сложность выделения сигналов на фоне акустических и электромагнитных помех. Влияние помех при регистрации акустической эмиссии существенно затрудняет интерпретацию ее параметров, характеризующих техническое состояние объекта контроля. Для повышения значения величины сигнал/помеха и достоверности полученных результатов контроля при количественной оценке параметров эмиссии используют методы фильтрации. Рассмотрено влияние величины сигнал/помеха на погрешность измерения параметров акустической эмиссии, выработанных при компенсации помех с помощью полиномиального метода фильтрации. **Метод.** В основу статистической модели определения влияния величины сигнал/помеха на погрешность измерения параметров акустической эмиссии положен метод машинного обучения — линейной регрессии. Зависимость погрешности измерения от величины сигнал/помеха аппроксимирована методом наименьших квадратов и визуализирована с помощью скатерограммы. **Основные результаты.** Выявлено, что при применении фильтра Баттерворта величина относительной погрешности измерений параметров акустической эмиссии не превышает 3 %, что на порядки ниже значений, полученных для фильтра Бесселя и вейвлет-фильтра на основе материнской функции Добеши 8-го порядка. Установлена высокая обратная не случайная корреляционная связь ($r > 0,9$), обусловленная снижением значений относительной погрешности измерений параметров эмиссии и повышением величины сигнал/помеха. Разработанная статистическая модель описывает влияние величины сигнал/помеха на значение относительной погрешности при оценке параметров акустической эмиссии. Функционирование предложенной модели подтверждено вычислением коэффициента детерминации и проверки его статистической значимости. **Практическая значимость.** Показано, что применение фильтра Баттерворта для компенсации помех существенно повышает информативность результатов измерений параметров акустической эмиссии. Разработанная статистическая модель может быть использована при создании новых или усовершенствовании существующих диагностических комплексов и систем обработки данных для повышения достоверности результатов акустического контроля.

Ключевые слова

статистическая обработка, повышение точности измерения, акустическая эмиссия, величина сигнал/помеха, акустический контроль, помехи, фильтр Баттерворта, вейвлет-фильтр, фильтр Бесселя

Ссылка для цитирования: Федоров А.В., Алтай Е., Степанова К.А., Кузиванов Д.О. Статистическая оценка влияния величины сигнал/помеха на погрешность измерения параметров акустической эмиссии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 6. С. 1205–1215. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1205-1215

The effect of signal-to-noise ratio value on the error in measuring acoustic emission parameters: statistical assessment

Alexey V. Fedorov¹, Yeldos Altay²✉, Ksenia A. Stepanova³, Dmitry O. Kuzivanov⁴

^{1,2,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ avfedorov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0612-922X>

² aeldos@inbox.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3736-0291>

³ ledy.xs93@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1811-3807>

⁴ kuzivanovdmitry@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9661-9614>

Abstract

Modern acoustic emission diagnostic systems and complexes are a sensitive tool for detecting developing defects at an early stage when monitoring the technical condition of objects under operational loads. A significant limitation of the application acoustic emission method is the difficulty in isolating signals against the background of acoustic and electromagnetic interference. The effect of interference during acoustic emission recording significantly complicates the interpretation of parameters that characterize the technical condition of the test object. To increase the value signal-to-noise ratio and increase the reliability of the results of acoustic emission testing in the quantitative assessment of parameters, filtering methods are used. The subject of this study is the study of the effect of signal-to-noise ratio value on the measurement error acoustic emission parameters formatted during noise compensation using the polynomial filtering method. The basis of the statistical model characterizing the effect of signal-to-noise ratio value on the measurement error acoustic emission parameters is based on the machine learning method — linear regression. The dependence of the measurement error on the signal-to-noise ratio value was approximated by the least-squares method and visualized using a scattergram. It was found that when using the Butterworth filter, the relative measurement error acoustic emission parameters do not exceed 3 %, which are orders of magnitude lower than the values obtained for the Bessel filter and Daubechies mother functions 8 based on wavelet filter. A high inverse non-random correlation was established ($r > 0.9$), due to a decrease in the values of the relative measurement error emission parameters and an increase in the signal-to-noise ratio value. The developed statistical model describes the effect of the signal-to-noise ratio value on the value relative error in estimating the acoustic emission parameters. The adequacy of the developed model was confirmed by calculating the coefficient of determination and checking its statistical significance. It is shown that the use of Butterworth filter to compensate for interference significantly increases the information content of the results of measurements of acoustic emission parameters. The developed statistical model can be used in the development of new or improvement of existing complexes and systems for processing acoustic emission data to improve the reliability of the results of acoustic testing.

Keywords

statistical processing, measurement accuracy improvement, acoustic emission, signal-to-noise ratio, non-destructive testing, noise, Butterworth filter, wavelet filter, Bessel filter

For citation: Fedorov A. V., Altay Y., Stepanova K. A., Kuzivanov D. O. The effect of signal-to-noise ratio value on the error in measuring acoustic emission parameters: statistical assessment. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1205–1215 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1205-1215

Введение

В акустико-эмиссионной диагностике для уменьшения погрешности измерений параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ) важной научно-технической задачей является разработка помехоустойчивых методов обработки акусто-эмиссионной информации. Актуальность обусловлена тем, что помехоустойчивые методы во многом позволяют противостоять искажающим действиям помех, вызванных влиянием внешних факторов. К внешним факторам при проведении контроля АЭ и эксплуатации объекта следует отнести помехи, возникающие при работе силовых электрических установок, наводящие электрические импульсы в измерительный тракт, при сварке, в ходе механообработки и фрезеровании объекта контроля, от нагружающего устройства, при кавитации, при истечении жидкости и газа и др. [1–6].

Среди перечисленных помех ослабление электрической помехи импульсного происхождения — нетривиальная задача [4, 5]. Это связано с тем, что помеха имеет не только сумму детерминированных компонент, но и вариабельность в значениях амплитуды каждой компоненты. Влияние данной помехи снижает точность

измерения информационных составляющих и приводит к невозможности корректной интерпретации событий АЭ. Для уменьшения искажений и ослабления влияния помехи на составляющие сигнала АЭ применяют различные методы фильтрации, устойчивые к действиям помех. Однако при разработке методов фильтрации помех АЭ важно сохранение формы информационной составляющей, несущей диагностическую информацию результатов акустического контроля. Таким образом, среди известных методов обработки сигналов актуальность приобретает поиск методов фильтрации, обеспечивающих минимальность искажения формы информационной составляющей сигнала АЭ на выходе фильтров.

Обзор методов фильтрации сигналов АЭ

В работе [7] для уменьшения погрешности измерения и повышения значения величины сигнал/помеха выполнен анализ методов обработки сигнала АЭ, который показал, что широкое применение нашли способы вейвлет-фильтрации, эмпирической модовой декомпозиции, кластерного анализа и пространственно-временной обработки. В ходе анализа особое внимание

уделено поиску особенностей методов. Во-первых, простых и высокоточных методов по математической реализации. Во-вторых, особенностям системы обработки, например отсутствию необходимости использования схемы фильтрации высоких порядков, влияющих на форму сигнала, выбором математического базиса разложения сигнала и специальных опорных каналов, требующих отдельной формы сигнала помехи для ее фильтрации. В результате анализа методов обработки данных АЭ для высокоточной фильтрации, максимального ослабления помех при минимальных искажениях формы сигналов АЭ, установлена применимость методов полиномиальной фильтрации, представляющих собой оптимальный класс фильтров [5]. Минимальное искажение формы сигнала АЭ необходимо для дальнейшей оценки их информативных параметров при определении технического состояния объекта контроля [8]. Наличие искажений увеличивает погрешность оценки параметров АЭ и, как следствие, достоверность результатов контроля.

Применимость методов полиномиальной фильтрации обусловлена возможностью вариативной настройки характеристик фильтрации в зависимости от параметров сигналов АЭ для выделения информационных составляющих из зашумленной смеси сигнала и помехи. При синтезе фильтров данного класса принято использовать полином Баттерворта, реже полиномы Бесселя, Чебышева [9] и, в ряде случаев, полином Ньютона [10]. Это связано с тем, что фильтры, аппроксимированные полиномом Баттерворта в полосах пропускания сигнала и подавления помехи, не имеют пульсаций, частотная характеристика и коэффициент усиления фильтра не зависят от порядка (степени) полинома и являются равнотонными, монотонными и стабильными при сравнении с перечисленными фильтрами. Во время обработки сигналов фильтры с полиномом Баттерворта обеспечивают выработку наименьших значений собственной ошибки, обусловленной их характеристиками. Отметим, что корни полиномов Баттерворта [5] и Ньютона [11, 12] с биномиальной структурой [10] являются общепринятым видом размещения в круговую структуру корней передаточной функции, что делает систему фильтрации устойчивой и более предпочтительной для практического применения при обработке сигналов.

В работе [13] для улучшения помехозащищенности тракта регистрации сигналов АЭ впервые предложено использовать аналоговую топологию фильтров Баттерворта на операционных усилителях. Топология реализована в виде автоматически перестраиваемых четырех двухзвенных активных фильтров нижних и верхних частот на основе операционных усилителей [13]. Такая реализация фильтров позволила улучшить помехозащищенность системы регистрации сигналов. Однако, в силу изменения параметров и структуры сигналов АЭ, а также влияющих помех в результате аналоговой фильтрации, происходит недостаточное шумоподавление. В связи этим решаются задачи цифровых методов обработки сигналов АЭ для снижения влияния помех на выходе средств аналоговой фильтрации [5]. Наличие не ослабленных помех существенно

снижает достоверность и информативность анализа сигналов АЭ. В связи с этим важной задачей является применение методов цифровой фильтрации.

В работах [5, 7, 8] выявлено, что реализация цифровых фильтров, аппроксимированных полиномами Баттерворта для фильтрации помех, является менее проработанной для решения задачи цифровой обработки сигналов АЭ. Проведен сравнительный анализ и дана оценка эффективности методов цифровой фильтрации, а именно полиномиальных фильтров верхних и нижних частот Баттерворта, Бесселя для уменьшения погрешности измерения параметров АЭ и повышения значения величины сигнал/помеха. Установлено, что сочетание методов спектрального анализа и вариативной настройки параметров фильтров позволяют максимизировать величину сигнал/помеха [5, 14] и снизить погрешность измерения амплитудных и временных параметров сигнала [8]. В работах [8, 14] показано, что среди методов полиномиальной фильтрации высокую точность обработки сигнала АЭ при минимальных искажениях информативных составляющих сигнала акустической эмиссии способны обеспечить фильтры, аппроксимированные полиномом Баттерворта. Среди фильтров Баттерворта высокие значения величины сигнал/помеха и наименьшее значение погрешности измерения параметров АЭ наблюдалось для полиномиального фильтра высокой частоты. Это позволило обосновать выбор данного метода для оценки взаимосвязи информационных составляющих сигнала и помех при многоканальной регистрации данных АЭ [5, 7].

В отличие от [5, 7, 8, 14], в настоящей работе рассмотрена статистическая оценка влияния величины сигнал/помеха на погрешность измерения диагностических параметров АЭ, выработанных на выходе методов полиномиальной цифровой фильтрации Баттерворта, которая сравнивается с зарекомендовавшими себя фильтрами вейвлета [15] и Бесселя [8]. Для полиномиальных методов цифровой фильтрации применено понятие «фильтр вырабатывает», согласно введенной терминологии в монографии Б.Р. Левина [16] при определении возможностей фильтра для обработки сигналов АЭ. Отметим, что в работе [16] понятие «фильтр вырабатывает» было применено в контексте согласованной фильтрации сигналов. Вместо общепринятого отношения сигнал/шум применено понятие «сигнал/помеха», так как рассматриваются результаты влияния помехи на погрешность измерения параметров АЭ.

Цель исследования состоит в разработке статистической модели регрессионной зависимости величины сигнал/помеха от погрешности измерения параметров АЭ на выходе методов полиномиальной фильтрации. Модель, характеризующая влияния величины сигнал/помеха на погрешность измерения параметров АЭ разработана на основе метода машинного обучения — линейной регрессии. Выбор метода для разработки модели обоснован его работоспособностью и высокой чувствительностью к анализируемым данным [17], а также отсутствием требований по специальному обучению выборок АЭ данных, полученных с объекта контроля.

Постановка задачи

Рассмотрим, по аналогии с работой [14], задачу обработки сигнала АЭ вида:

$$x(q) = s(q) + \xi(q), \quad (1)$$

$$\xi(q) = \sum_{i=1}^m A_i \sin\left(2\pi \frac{f_i}{f_d} k + \varphi_i\right), \quad (2)$$

где q — отсчеты измерений; $s(q)$ — сигнал АЭ; $\xi(q)$ — помеха; m — число гармоник помехи; A_i — амплитуда i -ой гармоники помехи; f_i — частота идентифицированной помехи [5, 7] в диапазоне от 400 до 1200 кГц; f_d — частота дискретизации помехи 4 МГц; k — порядковый номер отсчетов помехи; φ_i — начальная фаза сигнала i -ой гармоники помехи.

При обработке сигнала АЭ необходимо решить задачу выделения составляющих $s(q)$ путем фильтрации анализируемого сигнала $x(q)$, регистрируемого в дискретные моменты времени $q = q_1, \dots, q_n$, от помехи $\xi(q)$.

Данная задача решена при допущении, что амплитуда влияющей помехи (2) известна, что является типовым допущением при решении аналогичных задач для представления результатов обработки.

Материал и метод исследования

Материал исследования. Исходным материалом исследований при разработке модели регрессионной зависимости служат значения отношения сигнал/помеха и относительной погрешности, измеренные при реализации аддитивной смеси (1) сформированного сигнала АЭ [8] и помехи (2) [14] на выходе методов цифровой фильтрации. Согласно допущению, рассмотренному в разделе «Постановка задачи», для реализации различного набора входных данных АЭ аддитивная смесь сигнала сформирована при значениях зашумленности: –10 дБ, –5 дБ, 0 дБ, 5 дБ, 10 дБ [14].

Метод исследования. Синтез цифровых фильтров с бесконечной импульсной характеристикой, а именно фильтров верхних частот Баттерворта и Бесселя, осуществлена в нормированном диапазоне при помощи фильтров-аналогов с использованием билинейного преобразования [5, 14]. Во избежание вносимого искажающего воздействия фильтрами высоких порядков на параметры сигнала АЭ и уменьшения громоздкости вычисления передаточной функции фильтров, были вы-

браны полиномы второго порядка ($n = 2$) [5, 7, 8]. Для рассматриваемых бесконечных импульсных характеристик фильтров выбрана частота среза сформированной информационной составляющей сигнала АЭ, равная 240 кГц при частоте дискретизации 4 МГц [8, 14]. На основании данных частот рассчитана передаточная функция цифровых фильтров Баттерворта и Бесселя $n = 2$. Рассчитанные передаточные функции непрерывных фильтров высоких частот и их билинейное преобразование представлены в табл. 1.

Для обеспечения минимальных искажений информационной составляющей обрабатываемого сигнала использовалась двунаправленная фильтрация. Отметим, что в отличие от однонаправленной фильтрации сигнала в виде «вход-выход», под двунаправленной фильтрацией понимается обработка сигнала «в обе стороны». При такой фильтрации сигналы АЭ обрабатываются в прямом, а затем в обратном направлениях [7]. Возникающие искажения, вносимые системой фильтрации, взаимно компенсируются. Структурная схема двунаправленной реализации фильтров высокой частоты, а также их свертка в частотной области для обработки сигналов АЭ представлены в работе [14].

Вейвлет-фильтрация сигнала выполнена на основе мягкой пороговой обработки (soft threshold) при выборе материнской вейвлет-функции Добеши 8-го порядка гладкости и 8-го уровня разложения [15]. Данные параметры вейвлет-фильтрации для оценки и сравнения результативности обработки выбраны из работы [15]. Следует отметить, что вейвлет-функция Добеши выбранного порядка и уровня разложения сигнала в [15] применены исходя из способности данного метода для выделения информативных параметров сигнала АЭ при низких значениях величины сигнал/помеха.

Согласно рекомендации [18], относительная погрешность измерений (δ) оценена для следующих параметров АЭ: среднее квадратическое отклонение (σ_U), среднеквадратическое значение сигнала ($U_{СКЗ}$), амплитуда сигнала (U), энергетический параметр MARSE (Measured Area of the Rectified Signal Envelope — измеренная площадь огибающей сигнала). Выбор перечисленных параметров АЭ обоснован тем, что они при контроле технического состояния инструмента являются чувствительными к выявлению связей со свойствами источника АЭ [18]. Статистические параметры характеризуют: отклонение отсчетов амплитуды анализируемого сигнала относительно среднего

Таблица 1. Передаточная функция рассчитанных фильтров верхних частот

Table 1. Transfer function of calculated high-pass filter

Полином фильтра, $A(s)$	Передаточные функции	
	непрерывная, $W(s)$	дискретная, $W(z)$
Баттерворта $s^2 + 1,414\Omega_C s + \Omega_C^2$	$\frac{s^2}{s^2 + 0,176s + 0,015}$	$\frac{0,915z^2 - 1,831z + 0,915}{z^2 - 1,824z + 0,832}$
Бесселя $s^2 + 1,732\Omega_C s + \Omega_C^2$	$\frac{s^2}{s^2 + 0,216s + 0,015}$	$\frac{0,899z^2 - 1,798z + 0,899}{z^2 - 1,791z + 0,805}$

Примечание. s — комплексная переменная непрерывной передаточной функции фильтра; Ω_C — частота среза фильтра; z — комплексная переменная дискретной передаточной функции фильтра.

значения (σ_U), мощности или действующего значения сигнала (U_{CK3}) и максимальной амплитуды электрического напряжения сигнала (U). Параметр MARSE характеризует вклад амплитуды колебаний электрического напряжения в общую энергию сигнала АЭ, рассчитываемую под площадью или квадратом огибающей импульса. Огибающая сигнала АЭ — специальная линия, объединяющая вершины амплитуды положительной полуволны анализируемого сигнала [18]. Расчет перечисленных амплитудных параметров осуществлен при использовании встроенных команд программной среды MATLAB. При вычислении относительной погрешности перечисленных параметров под исходной формой сигнала (эталоном) принята форма экспериментально-тестового сигнала АЭ, сформированная в

работе [8]. Схема обработки и вычисления параметров показана на рис. 1.

Статистическая модель, характеризующая влияния величины сигнал/помеха на значение относительной погрешности при оценке параметров АЭ, разработана с помощью линейной регрессии. Зависимость погрешности измерения от величины сигнал/помеха аппроксимирована методом наименьших квадратов и визуализирована при помощи скатерограммы, изображающей распределение двух переменных между величинами сигнал/помеха и относительной погрешности измерения параметров АЭ (предиктор). Выбор величины сигнал/помеха для регрессионной зависимости обоснована тем, что данный критерий наиболее полно характеризует устойчивость системы обработки сигнала

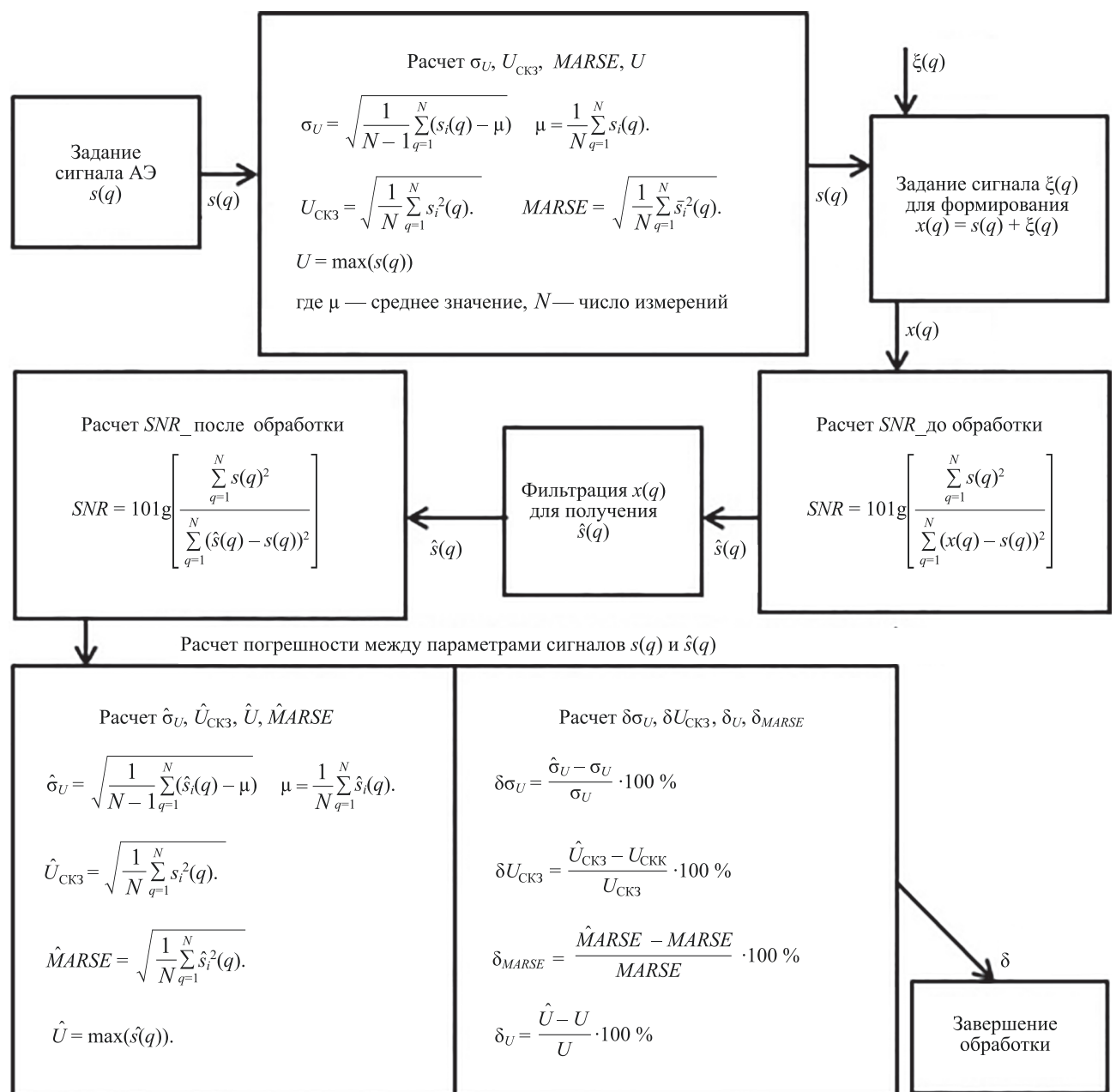


Рис. 1. Схема обработки сигнала акустической эмиссии

Fig. 1. Acoustic emission signal processing scheme

к искажающей помехе для уменьшения погрешности измерения параметров АЭ.

Связь величины сигнал/помеха и относительной погрешностью оценена с помощью коэффициента парной корреляции Пирсона r . Сила корреляционной связи определена по оценочной шкале Чедокка: $r_{0,4-0,7}$ — умеренная связь, $r_{0,7-0,9}$ — высокая связь, $r_{0,9-0,99}$ — весьма высокая связь [19]. Адекватность построенной регрессионной модели оценена коэффициентом детерминации R^2 . Корреляционная связь считалась значимой и неслучайной при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты исследований

Выполним оценку влияния величины сигнал/помеха на погрешность измерения параметров АЭ после фильтрации зашумленных сигналов для значений: -10 дБ, -5 дБ, 0 дБ, 5 дБ, 10 дБ [14]. На рис. 2 для фильтра Баттерворта показаны зависимости между величинами сигнал/помеха до и после обработки сигналов АЭ в виде скатерограммы.

Из представленных на рис. 2 зависимостей следует, что в силу уменьшения значения сигнал/помеха зашумленного сигнала на -1 дБ повышаются значения величины сигнал/помеха после обработки. Результат оценки парной корреляционной взаимосвязи показал, что между измерениями величины сигнал/помеха до и после обработки присутствует статистически значимая высокая обратная корреляционная взаимосвязь, а именно: $r = -0,972$, $R^2 = 0,946$ при $p = 0,005$. Данное утверждение характеризует уменьшение влияния составляющей помехи на сигнал АЭ за счет повышения величины сигнал/помеха на выходе фильтра. Это позволило выбрать значения сигнал/помеха для дальнейшей оценки, построения зависимости и разработки статистической модели влияния обсуждаемой величины на погрешность измерения параметров АЭ. Скатерограммы регрессионных зависимостей представлены на рис. 3.

Результаты статистического моделирования свидетельствуют о том, что с увеличением значений величины сигнал/помеха уменьшаются значения погрешности измерения параметров АЭ на выходе фильтра [5]. Величина погрешности не превышает 3 %. Вместе с тем между значениями величины сигнал/помеха и относительной погрешностью существует обратная корреляционная связь, характеризующая убывания значений погрешности измерений параметров АЭ. Запишем статистическую модель, характеризующую данную связь, с помощью уравнения линейной регрессии, ее функциональность оценим коэффициентом детерминации R^2 , а силу связи корреляцией r по значению значимости p модели.

Для метода фильтрации [5], основанного на фильтре Баттерворта, получены следующие значения:

$$y_{\delta\sigma} = -3,584 \cdot 10^{-5} \cdot \text{СП} + 2,904, R^2 = 0,964, p = 0,002;$$

$$y_{\delta U} = -4,625 \cdot 10^{-5} \cdot \text{СП} + 2,244 \\ \text{при } r = -0,871, R^2 = 0,759, p = 0,050;$$

$$y_{\delta\text{СКЗ}} = -3,584 \cdot 10^{-5} \cdot \text{СП} + 2,904 \\ \text{при } r = -0,981, R^2 = 0,964, p = 0,002;$$

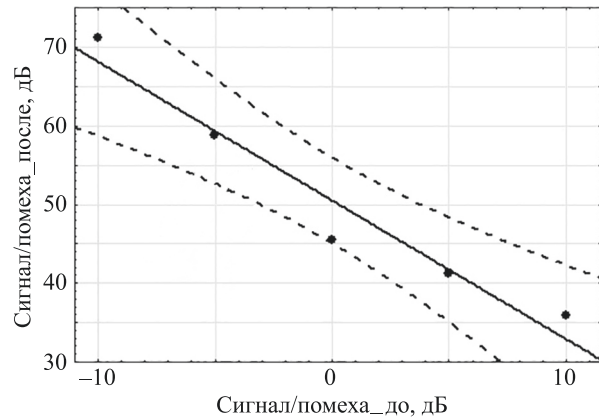


Рис. 2. Зависимости величин сигнал/помеха до и после обработки

● измеренные данные; — линия регрессии;
--- доверительный интервал

Fig. 2. Signal-to-noise ratio dependence before and after processing

Curve designations: ● measured data; — is the regression line;
--- confidence interval

$$y_{\delta\text{MARSE}} = -1,5 \cdot 10^{-5} \cdot \text{СП} + 2,902 \\ \text{при } r = -0,963, R^2 = 0,928, p = 0,008,$$

где СП — значение показателя сигнал/помеха.

Результат регрессионного анализа подтвердил влияние величины сигнал/помеха на погрешность измерений параметров АЭ. Факт данного влияния подтверждается статистически значимой сильной обратной корреляцией между величиной сигнал/помеха и относительной погрешностью. Минимальное ($R^2 = 0,759$) и максимальное ($R^2 = 0,964$) значения коэффициента детерминации (для метода [5]) ближе к единице, которая характеризует точность построенной статистической модели. Статистическая модель считается точной, когда величина коэффициента детерминации ближе к единице [7]. В данном исследовании значения значимости при $p = 0,05$ или $p < 0,05$ определяют неслучайность корреляционных связей. Следует также отметить, что параметры АЭ, измеренные при высоких значениях величины сигнал/помеха, могут быть необходимыми для использования при проведении предиктивной аналитики технического состояния объекта контроля [20].

Обсуждение

Амплитудные параметры сигналов демонстрируют наилучшую корреляционную связь со свойствами источника АЭ, наделяемыми объект контроля, и описывают энергетическое содержание акустических явлений [18]. Однако на точность и достоверность оценки амплитудных параметров АЭ сильно влияют помехи, снижая величину сигнал/помеха и увеличивая погрешность оценки параметров АЭ.

Рассматриваемые данные исследования демонстрируют статистически значимое влияние величины сигнал/помеха на относительную погрешность при оценке

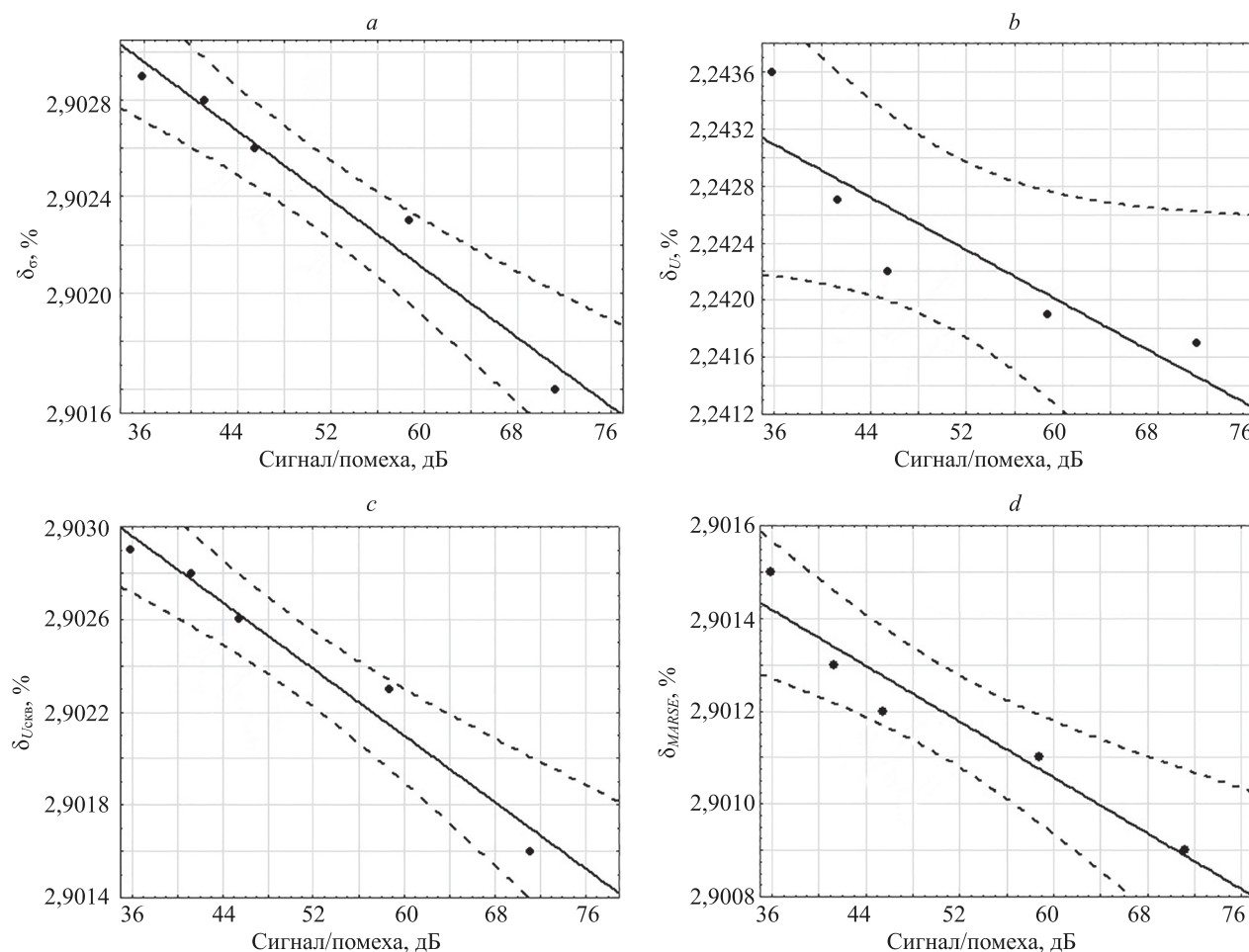


Рис. 3. Результаты погрешности измерения параметров акустической эмиссии в зависимости от величины сигнал/помеха для фильтра Баттерворта [5]: σ_U (a); U (b); U_{CK3} (c); $MARSE$ (d)

● измеренные данные; — линия регрессии; --- доверительный интервал

Fig. 3. Error of measurement of the acoustic emission parameters in dependence value signal-to-noise ratio for Butterworth filters [5]: σ_U (a); U (b); U_{CK3} (c); $MARSE$ (d)

Curve designations: ● measured data; — is the regression line; --- confidence interval

параметров АЭ. Величина относительной погрешности измерений параметров АЭ не превысила 3 % при значении сигнал/помеха 71 дБ. Данный результат обнаружен для фильтра, аппроксимированного полиномом Баттерворта [5]. Для подтверждения влияния величины сигнал/помеха на относительную погрешность рассматриваемые результаты были подвергнуты сравнению с имеющимися методами фильтрации помех АЭ. Для сравнения выбраны фильтры Бесселя [8] и вейвлета [15], статистические зависимости которых показаны в табл. 2.

Из зависимостей, представленных в табл. 2, видно, что аналогично фильтру Баттерворта в силу увеличения величины сигнал/помеха убывает значение относительной погрешности. Однако, если сравнить величину относительной погрешности между собой, фильтр, аппроксимированный полиномом Бесселя (табл. 2) на выходе системы обработки сигнала, наделает погрешность до 82 % при 25 дБ, в то время как для метода вейвлет-фильтрации данная величина составило 83 % при 8 дБ. В работе [21, С. 60] показано, что величина относительной погрешности в определя-

емых параметрах сигнала АЭ может быть неустойчива и находиться в диапазоне от 29,22 % до 82,72 %, соответственно.

Полученные результаты оценки в настоящей работе показали, что величины относительной погрешности для фильтров Бесселя и вейвлета находятся внутри обсуждаемого диапазона погрешностей, согласно работе [21, С. 60], тогда как для разработанного метода [5] они составили не более 3 %.

Высокое значение величины относительной погрешности связано с тем, что во время обработки фильтры Бесселя [8] и вейвлета [15] способны не только задерживать помехи, но и сглаживать, и искажать амплитудные составляющие экспериментально-тестовой формы сигнала, что также наблюдалось в результатах исследований [14]. Вейвлет-фильтр помимо сглаживания информационных составляющих АЭ, размывает форму сигнала, что было обнаружено в работах [22, 23]. Заметим, что ранее отмечалось повышение результативности обработки сложно структурированных сигналов при использовании фильтров: Баттерворта в работе [24], Бесселя в [25] и вейвлета в [26]. При различных

Таблица 2. Сравнение погрешностей измерения параметров акустической эмиссии в зависимости от величин сигнал/помеха для фильтров Бесселя [8] и вейвлет

Table 2. Comparison of measurement errors of acoustic emission parameters depending on the signal/noise values for the Bessel filter [8] and the wavelet filter

Параметр	Фильтр Бесселя	Вейвлет-фильтр
σ_U		
U		
$U_{СКЗ}$		
MARSE		

Примечание. Обозначения кривых: • измеренные данные; — линия регрессии; --- доверительный интервал

наборах входных данных измерений повышение результативности обработки сигнала для фильтра Баттерворта также было обнаружено в [26].

Между значениями величин сигнал/помеха и относительных погрешностей для фильтров Бесселя [8] и вейвлета [15] существует обратная связь.

Приведем показатели связи для метода фильтрации, основанного на фильтре Бесселя [14]:

$$y_{\delta\sigma} = -0,013 \cdot \text{СП} + 81,912 \\ \text{при } r = -0,810, R^2 = 0,657, p = 0,009;$$

$$y_{\delta U} = -9 \cdot 10^{-4} \cdot \text{СП} + 79,173 \\ \text{при } r = -0,928, R^2 = 0,862, p = 0,022;$$

$$y_{\delta \text{СКЗ}} = -0,013 \cdot \text{СП} + 81,919 \\ \text{при } r = -0,818, R^2 = 0,669, p = 0,090;$$

$$y_{\delta \text{MARSE}} = -0,007 \cdot \text{СП} + 81,781 \\ \text{при } r = -0,738, R^2 = 0,546, p = 0,153,$$

и для вейвлет-фильтрации [15]:

$$y_{\delta\sigma} = -0,029 \cdot \text{СП} + 80,467 \\ \text{при } r = -0,847, R^2 = 0,718, p = 0,069;$$

$$y_{\delta U} = -0,048 \cdot \text{СП} + 82,702 \\ \text{при } r = -0,687, R^2 = 0,473, p = 0,199;$$

$$y_{\delta \text{СКЗ}} = -0,029 \cdot \text{СП} + 80,465 \\ \text{при } r = -0,848, R^2 = 0,719, p = 0,069;$$

$$y_{\delta \text{MARSE}} = -0,037 \cdot \text{СП} + 80,343 \\ \text{при } r = -0,867, R^2 = 0,753, p = 0,056.$$

В теории статистической обработки измерений принято считать существование высокой связи полученной зависимости, если величина коэффициента корреляции $r > 0,700$.

В настоящей работе значения коэффициента корреляции для каждой построенной зависимости составили диапазоны: для метода обработки [5] $r = -0,871$ до $r = -0,981$ при $p < 0,05$; для фильтра Бесселя [8] $r = -0,738$ до $r = -0,928$ при $p < 0,05$ и $p > 0,05$; для метода фильтрации [15] $r = -0,687$ до $r = -0,867$ при $p > 0,05$. Высокая статистически значимая взаимосвязь показателей сигнал/помеха и относительной погрешности для метода [5] объясняется повышением

результативности обработки сигналов АЭ по точности и помехоустойчивости [14]. В связи со слабой результативностью фильтров вейвлет [15] и Бесселя [8] по точности и помехоустойчивости (табл. 2) значения коэффициента корреляции, характеризующего силу связи построенной зависимости, намного ниже, чем для метода, основанного на фильтре Баттерворта [5].

Коэффициент детерминации R^2 регрессионной модели для предложенного метода [5] имеет значение $R^2 > 0,759$, объясняющее сходимость данных измерений с линией регрессии при сравнении с фильтрами Бесселя $R^2 > 0,546$ [8] и вейвлета $R^2 > 0,473$ [15], полученных при помощи линейной модели.

Проведенные исследования показали, что снижение погрешности измерений параметров АЭ способен обеспечить метод обработки, основанный на использовании фильтра Баттерворта. Это обусловлено высокой помехоустойчивостью данного метода обработки [14]. Новизна исследования заключается в том, что для повышения достоверности оценки параметров АЭ на основе применения фильтров разработана статистическая модель, описывающая влияние величины сигнал/помеха на погрешность измерений. Ранее оценка данного влияния в существующих научных работах не была достаточно рассмотрена.

Дальнейшим исследованием может быть статистическая оценка параметров АЭ, характеризующих вторичные диагностические показатели АЭ и ее значимости для натурных измерений при реализации цифрового фильтра Баттерворта.

Заключение

В работе представлен результат статистической оценки влияния величины сигнал/помеха на погрешность измерения параметров акустической эмиссии при цифровой обработке сигналов фильтрами Баттерворта, Бесселя и вейвлет. Между величинами сигнал/помеха и относительной погрешности измерения параметров установлена обратная высокая статистически значимая корреляционная взаимосвязь. Установлено, что при высоких значениях величины сигнал/помеха фильтр Баттерворта способен обеспечить относительную погрешность измерения диагностических параметров акустической эмиссии, не превышающую 3 % при отношении сигнал/помеха 71 дБ.

Литература

1. He Y., Li M., Meng Z., Chen S., Huang S., Hu Y., Zou X. An overview of acoustic emission inspection and monitoring technology in the key components of renewable energy systems // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. V. 148. P. 107146. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107146>
2. Kharrat M.A., Ramasso E., Placet V., Boubakar M.L. A signal processing approach for enhanced acoustic emission data analysis in high activity systems: Application to organic matrix composites // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. V. 70-71. P. 1038–1055. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.08.028>
3. Il K.K., Hwan R.U., Pil C.B. An appropriate thresholding method of wavelet denoising for dropping ambient noise // *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*. 2018. V. 16. N 3. P. 1850012. <https://doi.org/10.1142/S0219691318500121>

References

1. He Y., Li M., Meng Z., Chen S., Huang S., Hu Y., Zou X. An overview of acoustic emission inspection and monitoring technology in the key components of renewable energy systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, vol. 148, pp. 107146. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107146>
2. Kharrat M.A., Ramasso E., Placet V., Boubakar M.L. A signal processing approach for enhanced acoustic emission data analysis in high activity systems: Application to organic matrix composites. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, vol. 70-71, pp. 1038–1055. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.08.028>
3. Il K.K., Hwan R.U., Pil C.B. An appropriate thresholding method of wavelet denoising for dropping ambient noise. *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 1850012. <https://doi.org/10.1142/S0219691318500121>

4. Barat V., Borodin Y., Kuzmin A. Intelligent AE signal filtering methods // *Journal of Acoustic Emission*. 2010. V. 28. P. 109–119.
5. Altay Y.A., Fedorov A.V., Stepanova K.A. Acoustic emission signal processing based on polynomial filtering method // *Proc. of the 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. 2022. P. 1320–1326. <https://doi.org/10.1109/ElConRus54750.2022.9755729>
6. Барат В.А. Развитие метода акустической эмиссии за счет автоматизации обработки данных, повышения помехоустойчивости и достоверности обнаружения трещиноподобных дефектов металлоконструкций: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М., 2019. 40 с.
7. Алтай Е., Федоров А.В., Степанова К.А. Оценка взаимосвязи информационных составляющих и помех сигналов акустической эмиссии // *Контроль. Диагностика*. 2022. Т. 25. № 6. С. 38–47. <https://doi.org/10.14489/td.2022.06.pp.038-047>
8. Алтай Е., Федоров А.В., Степанова К.А. Оценка влияния методов фильтрации на погрешность измерения параметров сигнала акустической эмиссии // *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. 2022. Т. 1. С. 24–27.
9. Paarman L.D. *Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective*. NY: Kluwer Academic Publishers, 2001. 440 p.
10. Somefun O., Akingbade K., Dahunsi F. Uniformly damped binomial filters: five-percent maximum overshoot optimal response design // *Circuits, Systems, and Signal Processing*. 2022. V. 41. N 6. P. 3282–3305. <https://doi.org/10.1007/s00034-021-01931-2>
11. Быстров С.В., Вундер Н.А., Ушаков А.В. Решение проблемы сигнальной неопределенности при аналитическом конструировании последовательного компенсатора в задаче управления пьезопроводом // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016. № 3. С. 451–459. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2016-16-3-451-459>
12. Быстров С.В., Вундер Н.А., Синетова М.М., Ушаков А.В. Аналитическое конструирование последовательного компенсатора для систем с запаздыванием на основе модификации типовых полиномиальных моделей // *Труды СПИИРАН*. 2017. № 3(52). С. 115–136. <https://doi.org/10.15622/sp.52.6>
13. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Чернова В.В. Диагностический модуль акустико-эмиссионной системы с автоматической фильтрацией помех // *Датчики и системы*. 2020. № 5. С. 3–14. <https://doi.org/10.25728/datsys.2020.5.1>
14. Алтай Е., Федоров А.В., Степанова К.А., Кузиванов Д.О. Оценка эффективности методов обработки сигналов акустической эмиссии при реализации полиномиальных цифровых фильтров // *Омский научный вестник*. 2022. № 3. С. 128–134. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2022-183-128-134>
15. Kharrat M., Ramasso E., Placet V., Baubakar M.L. A signal processing approach for enhanced Acoustic Emission data analysis in high activity systems: Application to organic matrix composites // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. V. 70-71. P. 1038–1055. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.08.028>
16. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Советское радио, 1968. 504 с.
17. Zakharov L.A., Martyushev D.A., Ponomareva I.N. Predicting dynamic formation pressure using artificial intelligence methods // *Journal of Mining Institute*. 2022. V. 253. N 1. P. 23–32. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.11>
18. Бехер С.А., Бобров А.Л. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии. Новосибирск: СГУПС, 2013. 145 с.
19. Салин В.Н., Чурилова Э.Ю. Практикум по курсу «Статистика» (в системе STATISTICA). М.: Перспектива, 2002. 188 с.
20. Elforjani M., Shanbr S. Prognosis of bearing acoustic emission signals using supervised machine learning // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018. V. 65. N 7. P. 5864–5871. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2767551>
21. Овчарук В.Н., Турисев Ю.А. Регистрация и обработка акустико-эмиссионной информации в многоканальных системах. Хабаровск: ТОГУ, 2017. 116 с.
22. Rakshit M., Das S. An efficient ECG denoising methodology using empirical mode decomposition and adaptive switching mean filter // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2018. V. 40. P. 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2017.09.020>
23. Altay Y.A., Kremlev A.S. Signal-to-noise ratio and mean square error improving algorithms based on newton filters for measurement ECG data processing // *Proc. of the 2021 IEEE Conference of Russian*
4. Barat V., Borodin Y., Kuzmin A. Intelligent AE signal filtering methods. *Journal of Acoustic Emission*, 2010, vol. 28, pp. 109–119.
5. Altay Y.A., Fedorov A.V., Stepanova K.A. Acoustic emission signal processing based on polynomial filtering method. *Proc. of the 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, 2022, pp. 1320–1326. <https://doi.org/10.1109/ElConRus54750.2022.9755729>
6. Barat V.A. Development of the acoustic emission method by automating data processing, increasing noise immunity and detection fidelity of the crack-like defects in metal structures. *Dissertation abstract for the degree of doctor of technical sciences*. Moscow, 2019, 40 p. (in Russian)
7. Altay Ye., Fedorov A.V., Stepanova K.A. Estimation of relationship between information components and noise of acoustic emission signals. *Diagnostics*, 2022, vol. 25, no. 6, pp. 38–47. (in Russian). <https://doi.org/10.14489/td.2022.06.pp.038-047>
8. Altay Y., Fedorov A.V., Stepanova K.A. Assessment the effect of filtering methods on the measurement error of acoustic emission signal parameters. *International Conference on Soft Computing and Measurements*, 2022, vol. 1, pp. 24–27. (in Russian)
9. Paarman L.D. *Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective*. NY: Kluwer Academic Publishers, 2001, 440 p.
10. Somefun O., Akingbade K., Dahunsi F. Uniformly damped binomial filters: five-percent maximum overshoot optimal response design. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2022, vol. 41, no. 6, pp. 3282–3305. <https://doi.org/10.1007/s00034-021-01931-2>
11. Bystrov S.V., Vunder N.A., Ushakov A.V. Solution of signal uncertainty problem at analytical design of consecutive compensator in piezo actuator control. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, no. 3, pp. 451–459. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2016-16-3-451-459>
12. Bystrov S.V., Vunder N.A., Sinetova M.M., Ushakov A.V. Analytical design of consecutive compensator for control systems with delay based on modification of typical polynomial models. *SPIIRAS Proceedings*, 2017, no. 3(52), pp. 115–136. (in Russian). <https://doi.org/10.15622/sp.52.6>
13. Seryeznov A.N., Stepanova L.N., Kabanov S.I., Chernova V.V. Diagnostic module of acoustic emission system with automatic noise filtering. *Sensors & Systems*, 2020, no. 5, pp. 3–14. (in Russian). <https://doi.org/10.25728/datsys.2020.5.1>
14. Altay Y., Fedorov A.V., Stepanova K.A., Kuzivanov D.O. Estimating efficiency of acoustic emission signal processing methods in implementation of polynomial digital filters. *Omsk Scientific Bulletin*, 2022, no. 3, pp. 128–134. (in Russian). <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2022-183-128-134>
15. Kharrat M., Ramasso E., Placet V., Baubakar M.L. A signal processing approach for enhanced Acoustic Emission data analysis in high activity systems: Application to organic matrix composites. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, vol. 70-71, pp. 1038–1055. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.08.028>
16. Levin B.R. *Theoretical Background Of Statistical Radio Engineering*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1968, 504 p. (in Russian)
17. Zakharov L.A., Martyushev D.A., Ponomareva I.N. Predicting dynamic formation pressure using artificial intelligence methods. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 253, no. 1, pp. 23–32. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.11>
18. Bekher S.A., Bobrov A.L. *Fundamentals of Nondestructive Testing by the Method of Acoustic Emission*. Novosibirsk, STU, 2013, 145 p. (in Russian)
19. Salin V.N., Churilova E.Iu. *Practical Course on “Statistics”*. Moscow, Perspektiva Publ., 2002, 188 p. (in Russian)
20. Elforjani M., Shanbr S. Prognosis of bearing acoustic emission signals using supervised machine learning. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65, no. 7, pp. 5864–5871. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2767551>
21. Ovcharuk V.N., Turisev Iu.A. *Registration and Processing of Acoustic-Emission Information in Multichannel Systems*. Khabarovsk, PNU, 2017, 116 p. (in Russian)
22. Rakshit M., Das S. An efficient ECG denoising methodology using empirical mode decomposition and adaptive switching mean filter. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2018, vol. 40, pp. 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2017.09.020>
23. Altay Y.A., Kremlev A.S. Signal-to-noise ratio and mean square error improving algorithms based on newton filters for measurement ECG

- Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2021. P. 1590–1595. <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396391>
24. Altay Y.A., Kremlev A.S., Zimenko K.A., Margun A.A. The effect of filter parameters on the accuracy of ECG signal measurement // *Biomedical Engineering*. 2019. V. 53. N 3. P. 176–180. <https://doi.org/10.1007/s10527-019-09903-2>
 25. Avdeeva D.K., Kazakov V.Y., Natalinova N.M., Ivanov M.L., Yuzhakova M.A., Turushev N.V. The simulation results of the high-pass and low-pass filter effect on the quality of micropotential recordings on the electrocardiogram // *European Journal of Physical and Health Education*. 2014. V. 6. P. 1–10.
 26. Malghan P.G., Hota M.K. A review on ECG filtering techniques for rhythm analysis // *Research on Biomedical Engineering*. 2020. V. 36. N 2. P. 171–186. <https://doi.org/10.1007/s42600-020-00057-9>
- data processing. *Proc. of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, 2021, pp. 1590–1595. <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396391>
24. Altay Y.A., Kremlev A.S., Zimenko K.A., Margun A.A. The effect of filter parameters on the accuracy of ECG signal measurement. *Biomedical Engineering*, 2019, vol. 53, no. 3, pp. 176–180. <https://doi.org/10.1007/s10527-019-09903-2>
 25. Avdeeva D.K., Kazakov V.Y., Natalinova N.M., Ivanov M.L., Yuzhakova M.A., Turushev N.V. The simulation results of the high-pass and low-pass filter effect on the quality of micropotential recordings on the electrocardiogram. *European Journal of Physical and Health Education*, 2014, vol. 6, pp. 1–10.
 26. Malghan P.G., Hota M.K. A review on ECG filtering techniques for rhythm analysis. *Research on Biomedical Engineering*, 2020, vol. 36, no. 2, pp. 171–186. <https://doi.org/10.1007/s42600-020-00057-9>

Авторы

Федоров Алексей Владимирович — доктор технических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57219346304](https://orcid.org/0000-0003-0612-922X), <https://orcid.org/0000-0003-0612-922X>, avfedorov@itmo.ru

Алтай Ельдос — аспирант, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57194240500](https://orcid.org/0000-0002-3736-0291), <https://orcid.org/0000-0002-3736-0291>, aeldos@inbox.ru

Степанова Ксения Андреевна — кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57212027443](https://orcid.org/0000-0003-1811-3807), <https://orcid.org/0000-0003-1811-3807>, ledy.xs93@yandex.ru

Кузиванов Дмитрий Олегович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-9661-9614>, kuzivanovdmitry@gmail.com

Authors

Alexey V. Fedorov — D. Sc., Associate Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57219346304](https://orcid.org/0000-0003-0612-922X), <https://orcid.org/0000-0003-0612-922X>, avfedorov@itmo.ru

Yeldos Altay — PhD Student, Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57194240500](https://orcid.org/0000-0002-3736-0291), <https://orcid.org/0000-0002-3736-0291>, aeldos@inbox.ru

Ksenia A. Stepanova — PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57212027443](https://orcid.org/0000-0003-1811-3807), <https://orcid.org/0000-0003-1811-3807>, ledy.xs93@yandex.ru

Dmitry O. Kuzivanov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9661-9614>, kuzivanovdmitry@gmail.com

Статья поступила в редакцию 06.07.2022
Одобрена после рецензирования 19.09.2022
Принята к печати 12.11.2022

Received 06.07.2022
Approved after reviewing 19.09.2022
Accepted 12.11.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»