

Оценка влияния методов фильтрации на погрешность измерения параметров сигнала акустической эмиссии

Е. Алтай¹, А. В. Федоров², К. А. Степанова³

Университет ИТМО

¹aeldos@inbox.ru, ²avfedorov@itmo.ru, ³ledy.xs93@yandex.ru

Аннотация. Представлен метод обработки сигнала акустической эмиссии (АЭ) для выделения информационной составляющей из зашумленной записи. Метод основан на полиномиальной фильтрации цифровыми фильтрами Баттерворта. Для компенсации вносимых искажений полиномиальными фильтрами предложена схема двунаправленной обработки сигнала АЭ. Проанализирована способность фильтрации зашумленной записи и на основе количественных показателей проведена оценка погрешности измерения параметров сигнала АЭ. Результаты оценки показали, что разработанный метод фильтрации обеспечивает высокую точность обработки записи сигнала АЭ при сравнении с методами фильтрации Бесселя и Чебышева.

Ключевые слова: полиномы; фильтрация сигнала; высокочастотная помеха; сигнал акустической эмиссии; погрешность измерения; фильтр верхних частот

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в неразрушающем контроле для повышения точности измерения параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ) актуальной научной задачей является разработка методов фильтрации. Данная актуальность обусловлена тем, что методы фильтрации во многом позволяют противостоять искажающему действию помех, возникающих при регистрации сигналов АЭ и повысить точность измерения при выделении информационных составляющих. В практических условиях точность измерения параметров информационных составляющих сигналов АЭ значительной степени снижается тогда, когда влияет помеха, вызванного сварочным производством [1]. Наличие такой помехи в рассматриваемом наборе измерений приводит к искажению параметров сигнала АЭ и снижает их точностных характеристик и, следовательно, данные измерений становится непригодным даже для визуальной оценки акустических событий.

В работе [2] для выделения составляющих сигнала и помехи разработан метод полиномиальной фильтрации. Метод основан на сочетании методов спектрального анализа и оптимизирующей настройки параметров синтеза полиномиальных цифровых фильтров, позволяющей максимизировать отношения акустического сигнала к влияющей помехе на выходе системы обработки. Разработанный метод от существующих методов фильтрации отличается тем, что для аппроксимации передаточной функции

полиномиальных цифровых фильтров, а именно фильтров верхних и нижних частот (ФВЧ и ФНЧ) предложено выбрать полином Баттерворта. Выбор полиномиальной модели для синтеза фильтров обосновывался двумя особенностями. Во-первых, для решения задачи обработки сигналов АЭ применение данной полиномиальной модели в научной литературе является менее освященным. Во-вторых, частотная характеристика такого фильтра в полосе пропускания акустического сигнала становится монотонной, а в полосе подавления помехи более крутой и без пульсаций при сравнении с полиномиальными моделями Чебышева и Бесселя. Благодаря этим двум особенностям синтезированные фильтры являются предпочтительными для решения актуальной задачи высокоточной обработки сигнала при выделении информационных составляющих и помех, а также для изучения их характеристик и статистической связи, происходящих в измерительных каналах акустико-диагностической системы.

Двунаправленная реализация предложенных фильтров [2],[3] позволило решить задачу разделение сигналов на информационные составляющие и сигналы помехи. Решение такой задачи представляет не только практически интерес, но и теоретически. Например, изучение статистической связи между информационными составляющими, регистрируемой с помощью многоканальной системой позволяет проанализировать рассеяния сигналов АЭ в объекте контроля [4]; изучить среду распространения акустического сигнала от источника до датчиков АЭ; изучить однородность структуры материала объекта контроля [4]. Изучение статистической связи между составляющими помехи позволяет оценить снижение влияния мешающих факторов на составляющие сигналов АЭ, различие и сходства помех по частоте, амплитуде и распределению, характерных для объекта контроля. Следует также отметить, что результаты оценки статистической взаимосвязи помех между каналами могут быть значимыми не только для решения перечисленных задач, но и для повышения точности сортировки сигналов сложной формы, проводимой методами третичной обработки измерительных сигналов, результатом которых являются работы [5],[6].

Результаты дескриптивного анализа [3] выделенной помехи [2] показали, что статистика сигналов помехи имеет незначительную право/левостороннюю асимметрию и островершинность в ряду распределения. Значения статистического критерия Лиллиефорса также показал, что распределение помехи имеет негауссово распределение.

В отличие от [2],[3], в данной статье рассматриваются результаты оценки влияния методов полиномиальной фильтрации Баттерворта, Чебышева, Бесселя на погрешность измерения параметров информационных составляющих при использовании экспериментально-тестовых моделей сигнала АЭ и помехи. Такое исследование дает значимое преимущество, заключающееся в возможности синтезировать помехи и формировать их аддитивные модели для получения расчетно-теоретических результатов между входом и выходом системы фильтрации сигналов АЭ.

Целью рассматриваемой статьи является оценка расчетного показателя среднего квадрата отклонения экспериментально-тестового сигнала АЭ от отфильтрованного зашумленного сигнала, выработанного при реализации методов полиномиальной фильтрации для обоснования цифрового фильтра.

В рассматриваемой статье представлены результаты оценки влияния методов полиномиальной фильтрации на погрешность измерения параметров сигнала АЭ. Формулируется постановка задачи фильтрации сигналов АЭ при наличии помехи. Рассматриваются результаты предлагаемого метода фильтрации сигналов АЭ [2] и сравнивается его эффективность с ближайшими аналогами. Для получения расчетного показателя среднего квадрата отклонения формируется модель сигнала информационной составляющей.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сформулируем задачу фильтрации сигнала АЭ для оценки влияния методов полиномиальной фильтрации на погрешность измерения параметров информационных составляющих сигнала при влиянии помехи. Формулируемая задача обработки сигнала АЭ в первую очередь направлена на выделение информационных составляющих компонента $s(q)$ из аддитивной смеси сигналов АЭ и высокочастотной помехи $\xi(q)$, описываемого в виде (1)

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

где $s(q)$ – сигнал АЭ, $\xi(q)$ – высокочастотная помеха. Модель сигнала информационной составляющей формируется, как экспериментально-тестовая форма, а в качестве модели помехи рассматриваются характеристики идентифицированной формы сигнала электромагнитной помехи, изменяющейся в широком диапазоне частоты 800 кГц [2] вида

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

где m – число гармоник помехи, A_i – амплитуда i -ой гармоники помехи, f_i – частота помехи [2], f_d – частота дискретизации помехи, k – порядковый номер отсчетов помехи, φ_i – начальная фаза сигнала i -ой гармоники помехи.

Ставится задача выделения информационного сигнала $s(q)$ путем полиномиальной высокочастотной и низкочастотной фильтрации анализируемого сигнала $x(q)$, регистрируемого в дискретные моменты времени $q=q_1, \dots, q_n$, от искажающей помехи $\xi(q)$ для повышения результативности обработки и оценки погрешности измерения параметров сигнала АЭ.

III. ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИГНАЛА АЭ

При формировании информационной составляющей сигналов АЭ материалом для исследований служили зарегистрированные образцы записи сигналов АЭ в максимально-благоприятной обстановке при отсутствии каких-либо искажающих факторов среды. Исходные образцы записи сигналов АЭ получены с помощью сертифицированной акустической измерительной системы СЦАД в Университете ИТМО. Зарегистрированные таким образом сигналы АЭ были подвергнуты оценке спектральных и статистических характеристик для дальнейшего подавления остаточной низкоамплитудной низкочастотной помехи и формирования информационной составляющей. Спектральный анализ исходных сигналов показал, что информационная составляющая сигнала расположена в диапазоне частоты от 66 кГц до 240 кГц, а составляющая помехи расположена ниже частоты информационной составляющей. Низкочастотная помеха отфильтрована на основе ФВЧ Баттерворта при двунаправленной реализации. Для статистической оценки ослабления помехи в рассматриваемом наборе измерений использовался непараметрический критерий Вилкоксона. Выбор именно данного критерия обосновывалась тем, что позволяет оценить показатели двух зависимых случайных величин, то есть до и после использования фильтра. При данном анализе, если значение p -value данного критерия $p < 0,05$, принимается гипотеза об уменьшении влияния составляющей помехи на информационный сигнал, если $p > 0,05$, то гипотеза отвергается. В нашем случае значение $p < 0,0001$, что позволяет установить снижение влияния остаточной помехи на составляющие сигнала и позволяет в дальнейшем использовать данную форму сигнала как экспериментально-тестовую для оценки влияния методов фильтрации. На рис. 1 представлена форма экспериментально-тестового сигнала АЭ.

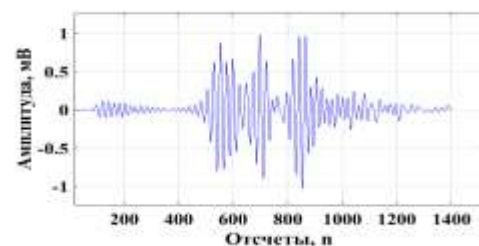


Рис. 1. Экспериментально-тестовая форма сигнала АЭ

IV. МЕТОДЫ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Синтез полиномиальных методов фильтрации осуществлялся при помощи передаточной функции нормированного фильтра нижних частот для получения ФВЧ и ФНЧ. Аналогично работе [2] использовались фильтры верхних и нижних частот, где для аппроксимации передаточной характеристики выбраны полиномы Бесселя и Чебышева. Следует отметить, что фильтры с полиномами Бесселя и Чебышева выбраны для оценки вносимых искажений во время фильтрации и погрешности измерения параметров сигналов АЭ при использовании метода обработки сигнала [2]. Настройка параметров данных фильтров осуществлялась нормировкой и трансформацией частоты среза [2].

Частота среза для рассматриваемых фильтров выбрана 240 кГц по результатам спектрального анализа.

При выборе такой частоты среза для ФВЧ фильтрация сигнала АЭ осуществлялась следующим образом: на вход фильтра подавался зашумленный сигнал $x(q)$, который обрабатывается двунаправленным полиномиальным ФВЧ для выделения $\xi(q)$ сигнала помехи. При выделении информационной составляющей сигнала $s(q)$ из зашумленного сигнала $x(q)$ вычитался выделенный $\xi(q)$ сигнал помехи, полученный на выходе полиномиального ФВЧ. При выделении информационной составляющей сигнала АЭ $s(q)$ на вход двунаправленного ФНЧ подается зашумленный сигнал $x(q)$ для фильтрации помехи $\xi(q)$. При выделении $\xi(q)$ сигнала помехи из зашумленного сигнала $x(q)$ вычитался отфильтрованный акустический сигнал $s(q)$, полученный на выходе ФНЧ.

Структурные схемы двунаправленной фильтрации сигнала АЭ для ФВЧ и ФНЧ представлены на рис. 2.

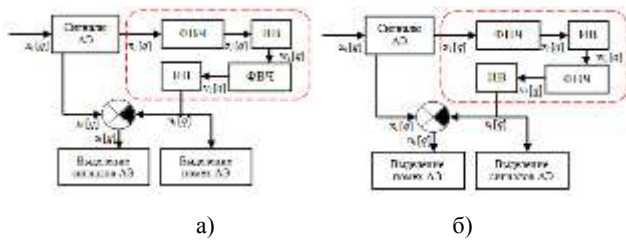


Рис. 2. Структурные схемы двунаправленной обработки сигнала АЭ: а) с помощью ФВЧ; б) с помощью ФНЧ.

Использование схемы двунаправленной фильтрации позволяет компенсировать вносимое искажающее воздействие полиномиальными фильтрами. Развернутое функциональное описание представленной структурной схемы фильтрации, а также их свертка в частотной области представлено в работе [3].

V. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА АЭ

Оценка погрешности измерения параметров сигнала АЭ осуществлялась при различных значениях зашумленности сигналов АЭ, которая вычислялась на основе количественного критерия отношения сигнал/помеха до обработки, вида

$$SNR_{до\ фильтрации} = 10 \lg \left[\frac{\sum_{n=1}^N x(q)^2}{\sum_{n=1}^N (s(q) - x(q))^2} \right]$$

Расчетный показатель среднего квадрата отклонения сигнала АЭ от отфильтрованного зашумленного сигнала вычислялся, как

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (s'(q) - s(q))^2}{N}}$$

где $s'(q)$ – отфильтрованный зашумленный сигнал АЭ, $s(q)$ – не зашумленный экспериментально-тестовый сигнал АЭ, N – общее количество отсчетов в

рассматриваемом фрагменте. Результаты оценки с точностью до пятого знака после запятой представлены в таблице.

ТАБЛИЦА I ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

ОСП_до, дБ	СКО, мВ		
	ФНЧ из [2]	ФНЧ Бесселя	ФНЧ Чебышева
-10	0,00029	0,0046	0,0061
-5	0,00035	0,0022	0,0059
0	0,00039	0,0065	0,0050
5	0,00043	0,0064	0,0055
10	0,00050	0,0013	0,0061
ОСП_до, дБ	ФВЧ из [2]	ФВЧ Бесселя	ФВЧ Чебышева
-10	0,00020	0,0028	0,0043
-5	0,00029	0,0029	0,0058
0	0,00032	0,0032	0,0061
5	0,00051	0,0030	0,0055
10	0,00058	0,0032	0,0055

В таблице показано, что при влиянии высокочастотной помехи метод полиномиальной высокочастотной фильтрации (на основе ФВЧ) лучше справляется с задачей обработки сигнала, чем ФНЧ. Если сравнить эффективность трех фильтров между собой по рассматриваемому критерию, то метод фильтрации, предложенный в работе [2] обеспечивает обработку сигнала АЭ при минимальных искажениях. Чем меньше значение данного критерия на выходе фильтров, тем точнее измеряются параметры сигналов АЭ. Учитывая это, базируясь на данных результатах оценки, для лучшей визуализации будет весьма целесообразно представить временную диаграмму результатов обработки для трех полиномиальных цифровых фильтров верхних частот.

Временная диаграмма исходного и отфильтрованного сигнала АЭ для трех методов фильтрации представлена на рис. 3–6.

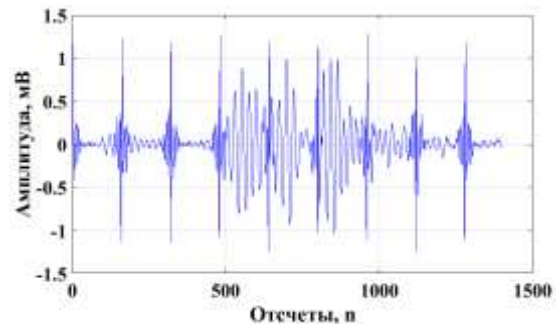


Рис. 3. Зашумленный сигнал АЭ

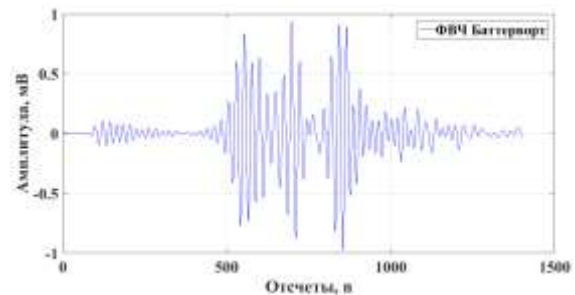


Рис. 4. Результат обработки предложенным фильтром [2]

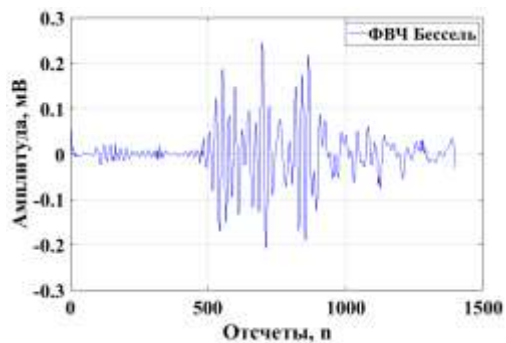


Рис. 5. Результат обработки фильтром Бесселя

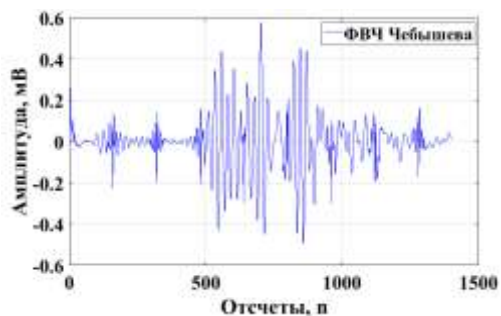


Рис. 6. Результат обработки фильтром Чебышева

Из представленных временных диаграмм не сложно заметить, что фильтрация сигнала методом обработки [2] позволяет отфильтровать составляющие сигнала при минимальных искажениях (рис. 4) в сравнении с фильтрами Бесселя (рис. 5) и Чебышева (рис. 6). Это достигается за счет использования разработанной схемы двунаправленной обработки (например, рис. 2). Если сравнить результаты обработки между методами фильтрации Бесселя и Чебышева, то фильтр Бесселя меньше вносит искажения и менее ослабляет помехи. Метод фильтрации Чебышева из-за пульсаций в полосе пропускания сигнала вносит существенное искажение на форму информационных составляющих сигнала АЭ.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены результаты обработки сигналов АЭ на основе метода полиномиальной фильтрации. Для минимизации погрешности измерения параметров сигнала АЭ и повышения результативности обработки предложено использовать метод высокочастотной фильтрации полиномом Баттерворта. Предложенный метод позволяет при минимальных искажениях отфильтровать информационную составляющую сигнала. Для компенсации вносимых искажений полиномиальными фильтрами разработана схема двунаправленной обработки сигналов АЭ. Показано, что использование предлагаемого метода фильтрации может значительной степени повысить точность обработки сигнала АЭ при сравнении с ближайшими аналогами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Степанова К.А. Разработка методики акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе формирования соединения сваркой трением с перемешиванием: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Университет ИТМО. СПб., 2020. 20 с.
- [2] Altay Y.A., Fedorov A.V., Stepanova K.A. Acoustic emission signal processing based on polynomial filtering method // Proceedings of the 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2022. P. 1320–1326.
- [3] Алтай Е., Федоров А.В., Степанова К.А. Дескриптивный анализ и оценка отношения сигнал/помеха, выработанных при реализации метода полиномиальной фильтрации сигналов акустической эмиссии // Цифровая обработка сигналов и ее применение. DSPA – 2022: доклады на 24-й Международной конференции. 2022. С. 1-6.
- [4] Бехер С.А. Методы контроля динамически нагруженных элементов подвижного состава при ремонте и в эксплуатации на основе комплексного использования тензометрии и акустической эмиссии: Автореф. дисс. доктора техн. наук. / НИТПУ. Томск, 2017. 36 с.
- [5] Григорьев Е.Б. Метод и программный комплекс обработки многоканальных записей электрокардиосигнала для диагностики ишемической болезни сердца: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина). СПб., 2019. 18 с.
- [6] Красичков А.С., Григорьев Е.Б. Оценка статистических характеристик могографической помехи при многоканальной регистрации электрокардиосигнала // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2018. №6. С. 118–125.