

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ

В статье представлен метод обработки сигнала акустической эмиссии (АЭ) для выделения информационной и помеховой составляющей из зашумленной записи. Метод основан на полиномиальной цифровой фильтрации. Для компенсации вносимых искажений фильтрами предложена схема двунаправленной обработки сигнала АЭ. Проанализирована работоспособность метода фильтрации зашумленной записи и на основе количественных показателей проведена оценка обработки. Результаты оценки показали, что представленный метод фильтрации обеспечивает устойчивость влияющим помехам и высокую точность обработки записи сигнала АЭ при сравнении с ближайшими аналогами.

**Ключевые слова:** сигнал акустической эмиссии, цифровой фильтр, полином Баттерворта, точность обработки, помехоустойчивая обработка, двунаправленная фильтрация, отношения сигнал/помеха.

**Введение.** На сегодняшний день в неразрушающем контроле для диагностики и оценки технического состояния опасных промышленных объектов широко используется метод акустической эмиссии (АЭ). Метод АЭ является высокоинформативным инструментом обнаружения развивающихся дефектов в материалах изделий в условиях их эксплуатации. Применение данного метода для оценки технического состояния и обнаружения дефектов на ранних стадиях их развития базируется на результатах анализа параметров зарегистрированных сигналов АЭ [1–3].

Однако широкое промышленное применение метода АЭ ограничено необходимостью выделения полезного сигнала на фоне помех различной физической природы, возникающих при проведении АЭ контроля и снижающих достоверность результатов АЭ контроля [1–6]. Для повышения качества обработки зарегистрированного сигнала и повышения достоверности результатов АЭ контроля применяют различные методы фильтрации [1–14]. При анализе методов фильтрации [15] особое внимание уделялось поиску более простых и высокоточных алгоритмов исходя из вычислительной и практической реализации методов при математических расчетах.

В работе [15] на основе экспериментальных исследований установлено, что для обработки сигналов АЭ методы полиномиальной фильтрации представляют собой оптимальный класс фильтров для

высокочастотной обработки и максимального ослабления помех при минимальных искажениях параметров сигналов. Такие фильтры в силу использования полиномиальных моделей для синтеза фильтров частотные фильтры называют полиномиальными [15, 16].

В данной статье, в сравнении с [15], исследуются вопросы, связанные с применимостью методов полиномиальной фильтрации Баттерворта, Бесселя, Чебышева при их цифровой реализации для обработки сигналов АЭ. В частности, рассматривается оценка влияния данных методов фильтрации на расчетно-теоретические показатели среднеквадратического отклонения и отношения сигнал/помеха, характеризующие эффективность обработки сигналов АЭ по точности и помехоустойчивости.

Рассматривается решение двух задач. Первая задача связана с высокочастотной фильтрацией цифровыми фильтрами верхних частот (ФВЧ) Баттерворта, Бесселя, Чебышева. Вторая задача связана с низкочастотной фильтрацией на основе фильтров нижних частот (ФНЧ) данными полиномиальными моделями. В каждой из решаемых задач для получения формы информационных и неинформационных (помеховых) составляющих сигналов АЭ используется схема вычитание.

Целью исследований являлось повышение качества обработки сигналов АЭ и оценка расчетно-теоретических показателей, полученных при вы-

делении информационных и неинформационных составляющих сигналов на выходе с помощью методов полиномиальной цифровой фильтрации.

**Постановка задачи исследования.** Сформулируем задачу для оценки влияния рассматриваемых методов фильтрации на количественные показатели при выделении информационной  $s(q)$  и неинформационной  $\xi(q)$  составляющих сигналов АЭ из аддитивной смеси  $x(q)$ , описываемой в виде (1)

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

где  $q$  — отсчеты измерений,  $s(q)$  — сигнал АЭ,  $\xi(q)$  — помеха. При этом модель  $s(q)$  сигнала информационной составляющей формируется как экспериментально-тестовая форма и выбирается из [17], а в качестве модели  $\xi(q)$  помехи рассматриваются характеристики идентифицированной формы сигнала электромагнитной помехи в диапазоне от 400 кГц до 1200 кГц, изменяющейся в широком диапазоне частоты 800кГц [15] вида

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

где  $m$  — число гармоник помехи;  $A_i$  — амплитуда  $i$ -ой гармоники помехи;  $f_i$  — частота идентифицированной помехи [15];  $f_g$  — частота дискретизации помехи;  $k$  — порядковый номер отсчетов помехи;  $\varphi_i$  — начальная фаза сигнала  $i$ -ой гармоники помехи.

**Задача 1. Высокочастотная фильтрация.** Рассмотрим задачу выделения составляющих сигнала  $s(q)$  из зашумленной входной последовательности  $x(q)$  путем вычитания составляющей  $\hat{\xi}(q)$ , полученной на выходе полиномиальных цифровых фильтров ВЧ, согласно (3),

$$s(q) = x(q) - \hat{\xi}(q). \quad (3)$$

**Задача 2. Низкочастотная фильтрация.** Рассмотрим задачу выделения составляющих сигнала  $\xi(q)$  из зашумленной входной последовательности  $x(q)$  путем вычитания составляющей  $\hat{s}(q)$ , полученной на выходе полиномиальных цифровых фильтров НЧ, согласно (4),

$$\xi(q) = x(q) - \hat{s}(q). \quad (4)$$

**Ставится задача:** используя измерения (1) при помощи (3) и (4) найти оценку  $\hat{s}(q)$  и  $\hat{\xi}(q)$  при по-

мощи полиномиальной цифровой двунаправленной фильтрации сигнала  $x(q)$ , регистрируемого в дискретные моменты времени  $q = q_1, \dots, q_n$ , для анализа расчетно-теоретических показателей качества обработки.

**Синтез, настройка и схема полиномиальной цифровой фильтрации.** Синтез полиномиальных методов фильтрации для формирования цифровых фильтров Баттерворта, Бесселя, Чебышева осуществляется в нормированном диапазоне с помощью передаточных функций непрерывных фильтров-аналогов [15], учитывая рекомендации [18, 19], параметры которых рассчитаны как [19]:

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_c &= \left( \frac{f_c}{f_A} \right) \cdot 2\pi, \\ \Omega_c &= \left( \frac{2}{T} \right) \operatorname{tg} \left( \frac{\omega_c}{2} \right) \end{aligned} \right\},$$

где  $f_c$  — частота среза;  $f_g$  — частота дискретизации;  $T$  — время «кадра» оцифровки.

Развернутые результаты синтеза фильтров представлены в [15]. Для частоты среза полиномиальных фильтров ВЧ и НЧ выбрана частота сформированной информационной составляющей сигнала АЭ [17], равная 240 кГц при частоте дискретизации 4МГц [15]. Преобразование рассчитанной непрерывной передаточной функции в дискретную осуществлялось на основе билинейного преобразования как  $s = \frac{2}{T} \left( \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right)$  при  $T = 1$  с.

Двунаправленная реализация цифровых фильтров предназначена для компенсации искажений, вносимых полиномиальными цифровыми фильтрами. В отличие от обычной однонаправленной реализации фильтров, в режиме «вход-выход» под двунаправленной фильтрацией понимается обработка сигнала АЭ в режиме «в обе стороны». При такой обработке зашумленные сигналы АЭ фильтруются в прямом направлении, а затем в обратном направлении. В результате возникающие фазовые сдвиги взаимно компенсируются. Структурные схемы двунаправленной обработки сигнала АЭ представлены на рис. 1.

При двунаправленной реализации ФВЧ и ФНЧ входная последовательность зашумленных сигналов АЭ обрабатывается фильтрами  $z_i[q]$  в прямом направлении, затем с помощью блока инверсии времени (ИВ) изменяется порядок следования отсчетов  $w_i[q]$  отфильтрованных сигналов на обратный. По-

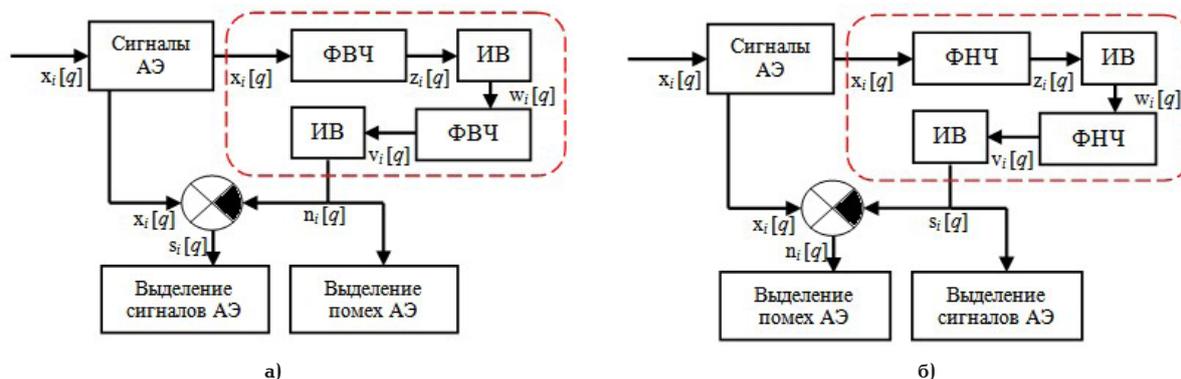


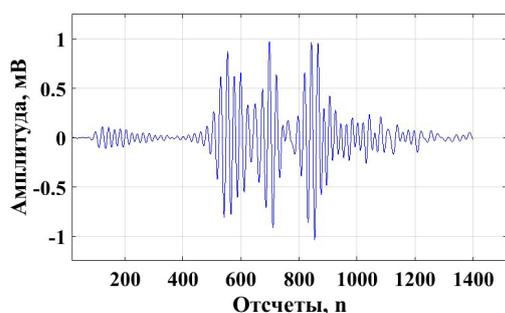
Рис. 1. Структурные схемы двунаправленной обработки сигнала АЭ: а) с помощью фильтров ВЧ; б) с помощью фильтров НЧ

лученные отсчеты на выходе блока  $w_i[q]$  обрабатываются в обратном направлении  $v_i[q]$  с помощью ФВЧ и ФНЧ, затем окончательная инверсия времени (блок ИВ) приводит к изменению порядка следования отсчетов на обратный. На выходе блоков ИВ возникающие фазовые сдвиги взаимно компенсируются и формируются сигналы помех  $n_i[q]$  (при использовании схемы с ФВЧ) и информационные сигналы  $s_i[q]$  (при использовании схемы с ФНЧ). Введение блока «сумматор-вычитатель» обеспечивает формирование информационных сигналов  $s_i[q]$ , полученных между исходным сигналом  $x_i(q)$  и сигналом на выходе блока ИВ ФВЧ, а также модели помехи  $n_i[q]$  между сигналом  $x_i(q)$  и сигналом на выходе блока ИВ ФНЧ.

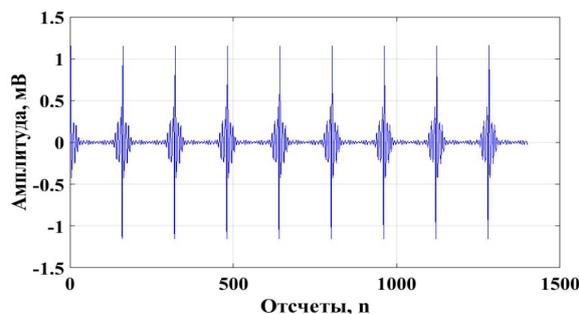
Применение рассматриваемой схемы обработки позволяет отдельно сформировать информационные составляющие и неинформационные составляющие сигналов АЭ. Согласно разработанной схеме обработки (рис. 1) свертка фильтров при двунаправленной реализации в частотной области представлена в следующем виде для ФВЧ (5) и ФНЧ (6)

$$\begin{cases} Z(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega})H(e^{j\omega}) \\ W(e^{-j\omega}) = Z(e^{-j\omega}) \Rightarrow X(e^{-j\omega})H(e^{-j\omega}) \\ V(e^{j\omega}) = W(e^{j\omega})H(e^{j\omega}) \Rightarrow X(e^{-j\omega})H(e^{j\omega})H(e^{-j\omega}) \\ N(e^{j\omega}) = V(e^{-j\omega}) = \\ = X(e^{-j\omega})H(e^{j\omega})H(e^{-j\omega}) \Rightarrow X(e^{j\omega})|H(e^{j\omega})|^2, \end{cases} \quad (5)$$

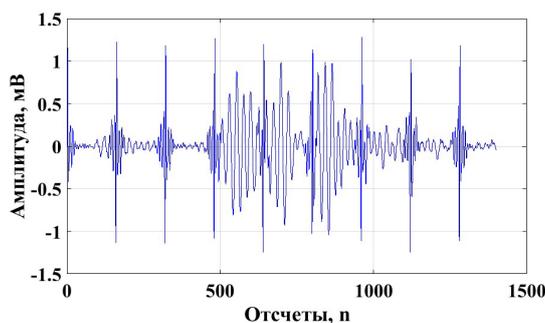
$$\begin{cases} Z(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega})H(e^{j\omega}) \\ W(e^{-j\omega}) = Z(e^{-j\omega}) \Rightarrow X(e^{-j\omega})H(e^{-j\omega}) \\ V(e^{j\omega}) = W(e^{j\omega})H(e^{j\omega}) \Rightarrow X(e^{-j\omega})H(e^{j\omega})H(e^{-j\omega}) \\ S(e^{j\omega}) = V(e^{-j\omega}) = \\ = X(e^{-j\omega})H(e^{j\omega})H(e^{-j\omega}) \Rightarrow X(e^{j\omega})|H(e^{j\omega})|^2, \end{cases} \quad (6)$$



а)



б)



в)

Рис. 2. Исходные формы сигналов: а) информационная составляющая; б) неинформационная составляющая; в) зашумленный сигнал АЭ

где  $\omega$  — частота;  $j$  — комплексная мнимая единица,  $Z(e^{j\omega})$  — обработанный сигнал в прямом направлении в частотной области;  $H(e^{j\omega})$  — комплексная характеристика фильтра;  $W(e^{j\omega})$  — изменение следования отсчетов сигнала в частотной области;  $V(e^{j\omega})$  — обработка сигнала в обратном направлении в частотной области;  $N(e^{j\omega})$  — выделенный сигнал шумовой помехи в частотной области с компенсацией фазовых сдвигов (для ФВЧ);  $S(e^{j\omega})$  — результирующий обработанный сигнал в частотной области с компенсацией фазовых сдвигов (для ФНЧ).

#### Выбор расчетных количественных показателей.

Количественная оценка влияния рассматриваемых методов фильтрации на расчетные показатели, а именно отношения сигнал/помеха ( $SNR$ ) до и после фильтрации и среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) определялись, как

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

$$SNR_{после\ фильтрации} = 10 \lg \left[ \frac{\sum_{q=1}^N s(q)^2}{\sum_{q=1}^N (\hat{s}(q) - s(q))^2} \right], \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^N (\hat{s}(q) - s(q))^2}{N}}, \quad (8)$$

где  $N$  — общее количество отсчетов в рассматриваемом наборе измерений. Выбор показателей (7) и (8) обосновывался тем, что позволяют получить расчетно-теоретические результаты фильтрации,

характеризующие эффективность обработки сигналов по точности и помехоустойчивости [20]. Сходства между информационными составляющими  $s(q)$  и  $\hat{s}(q)$  оценивались коэффициентом парной корреляции, так как оценивается значение парных измерений сигналов АЭ между входом и выходом, записанной в виде

$$r_{s,\hat{s}} = \frac{\sum_{q=1}^N (s_i(q) - \bar{s}(q))(\hat{s}_i(q) - \bar{\hat{s}}(q))}{\sqrt{\sum_{q=1}^N (s_i(q) - \bar{s}(q))^2 \sum_{q=1}^N (\hat{s}_i(q) - \bar{\hat{s}}(q))^2}}, \quad (9)$$

где  $s_i$  — текущее значение длины тестового сигнала АЭ,  $\bar{s}$  — среднее значение длины тестового АЭ сигнала;  $\hat{s}_i$  — текущее значение длины отфильтрованного сигнала АЭ;  $\bar{\hat{s}}$  — среднее значение длины отфильтрованного сигнала АЭ. Аналогично (9) сходства между неинформационными составляющими  $\xi(q)$  и  $\hat{\xi}(q)$  также оценивались коэффициентом парной корреляции, записанной как

$$r_{\xi,\hat{\xi}} = \frac{\sum_{q=1}^N (\xi_i(q) - \bar{\xi}(q))(\hat{\xi}_i(q) - \bar{\hat{\xi}}(q))}{\sqrt{\sum_{q=1}^N (\xi_i(q) - \bar{\xi}(q))^2 \sum_{q=1}^N (\hat{\xi}_i(q) - \bar{\hat{\xi}}(q))^2}},$$

где  $\xi_i$  — текущее значение длины сигнала помехи;  $\bar{\xi}$  — среднее значение длины сигнала помехи;

$\xi_i$  — текущее значение длины выделенного сигнала помехи;  $\bar{\xi}$  — среднее значение длины выделенного сигнала помехи.

**Результаты обработки.** Оценка эффективности методов обработки сигнала АЭ при реализации полиномиальных цифровых фильтров производилась при различных значениях зашумленности сигналов и осуществлялась в программной среде MatLab R2016a. На рис. 2 приведены формы исходного экспериментально-тестового сигнала АЭ, форма синтезированной помехи (2) и их зашумление. Для лучшей визуализации результата обработки сигнала на рис. 3 и 4 представлены только сигналы АЭ, полученные на выходе цифровых фильтров ВЧ и НЧ, аппроксимированных полиномом Баттерворта. Приведенные результаты моделирования фильтров иллюстрируют работоспособность рассматриваемых цифровых фильтров (разработанную в работе [15]) при выделении информационной и неинформационной составляющей сигнала АЭ.

Сравнительные оценки, представленные в табл. 1, показывают, что методы цифровой фильтрации [15], аппроксимированные полиномом Баттерворта, позволяют максимизировать значения показателя отношения сигнал/помеха (SNR) и минимизировать показатель среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) при зашумленности «-10дБ, -5дБ, 0дБ, 5дБ, 10дБ» в сравнении с методами цифровой фильтрации, аппроксимированные полиномами Бесселя и Чебышева.

Высокие значения показателя SNR характеризует устойчивость системы фильтрации к влияющим

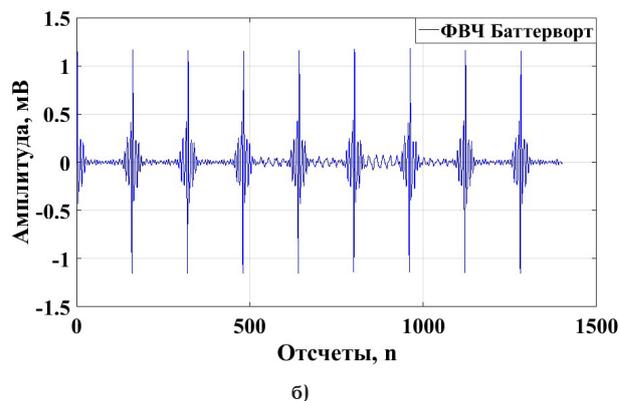
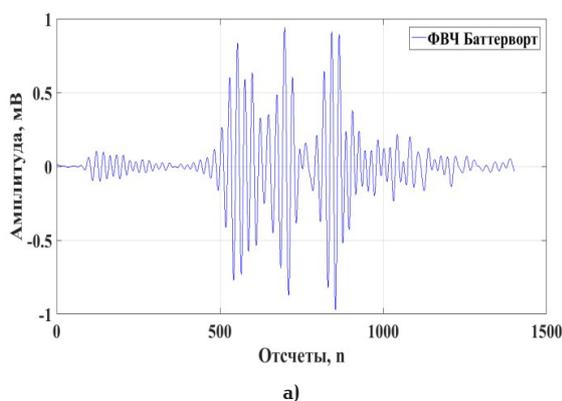


Рис. 3. Результаты обработки фильтром ВЧ:

а) выделенная информационная составляющая; б) выделенная неинформационная составляющая

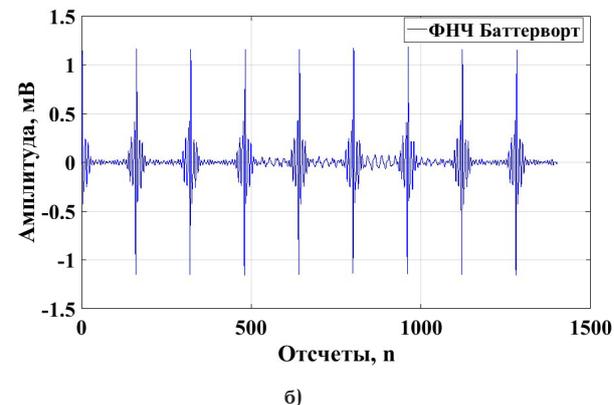
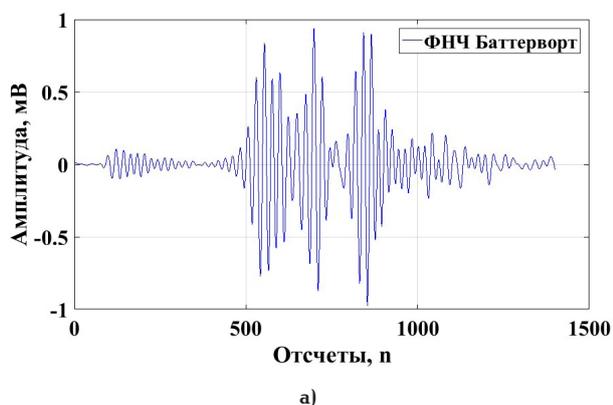


Рис. 4. Результаты обработки фильтром НЧ:

а) выделенная информационная составляющая; б) выделенная неинформационная составляющая

Оценка отношения сигнал/помеха и среднеквадратического отклонения

Показатели	ОСП_после, дБ			$\sigma$ , мВ		
	ФНЧ в [15]	ФНЧ Бесселя	ФНЧ Чебышева	ФНЧ Баттерворта	ФНЧ Бесселя	ФНЧ Чебышева
ОСП_до, дБ						
-10	55,9866	26,0380	19,7332	0,00029	0,0046	0,0061
-5	50,9737	16,6756	18,2825	0,00035	0,0022	0,0059
0	47,8142	14,2940	16,4388	0,00039	0,0065	0,0050
5	42,2212	11,3280	13,9640	0,00043	0,0064	0,0055
10	38,5917	9,2708	7,5650	0,00050	0,0013	0,0061
ОСП_до, дБ						
-10	71,1891	25,0885	28,9426	0,00020	0,0028	0,0043
-5	58,7505	24,6672	19,5249	0,00029	0,0029	0,0058
0	45,5076	23,6069	19,1447	0,00032	0,0032	0,0061
5	41,2702	22,2834	13,9796	0,00051	0,0030	0,0055
10	35,8920	21,9811	7,7510	0,00058	0,0032	0,0055

Таблица 2

Оценка коэффициента корреляции между сигналами АЭ и помехой

Показатели	$r_{s,i}$			$r_{i,i}$		
	ФНЧ в [15]	ФНЧ Бесселя	ФНЧ Чебышева	ФНЧ Баттерворта	ФНЧ Бесселя	ФНЧ Чебышева
ОСП_до, дБ						
-10	0,9971	0,9457	0,5219	0,9983	0,8017	0,6359
-5	0,9968	0,9455	0,5213	0,9946	0,6787	0,4200
0	0,9965	0,9450	0,5210	0,9832	0,4607	0,2516
5	0,9961	0,9435	0,5207	0,9597	0,2799	0,1446
10	0,9958	0,8248	0,5193	0,9327	0,0918	0,0819
ОСП_до, дБ						
-10	0,9994	0,9598	0,9024	0,9987	0,6906	0,6342
-5	0,9993	0,9592	0,8996	0,9954	0,5386	0,4186
0	0,9990	0,9940	0,9656	0,9840	0,3880	0,2834
5	0,9988	0,9354	0,8657	0,9768	0,1979	0,1441
10	0,9985	0,9263	0,8519	0,9593	0,1128	0,0681

помехам при зашумленности «-10дБ, -5дБ, 0дБ, 5дБ, 10дБ», а низкие значения показателя  $\sigma$  определяет точность обработки сигнала при выделении информационной составляющей АЭ. Следует отметить, что значения показателя SNR при «-10дБ, -5дБ» представляет информацию о превышении амплитуды помехи по отношению к амплитуде информационного сигнала АЭ, следовательно, «5дБ и 10дБ» превышение амплитуды сигнала АЭ по отношению к амплитуде помехи, «0дБ» амплитуда помехи и сигнала в равной степени.

Если сравнить количественные результаты для фильтров ВЧ и НЧ Баттерворта, то при цифровой высокочастотной фильтрации на основе ФВЧ улучшается избирательность системы по отношению к высокочастотной помехе, чем при цифровой фильтрации на основе ФНЧ. Это говорит о перспективности дальнейшего использования данных фильтров для обработки сигнала.

Используя шкалу Чеддока [21] для интерпретации коэффициента корреляции, можно отметить, что между экспериментально-тестовой и отфильтрованной информационной составляющей сигнала

АЭ, а также между синтезированной и выделенной помехами существует прямая и тесная корреляционная взаимосвязь (табл. 2). Корреляция измерений по шкале Чеддока считается высокой при значениях корреляционной взаимосвязи  $r > 0,7$ , а при  $r > 0,9$  — весьма высокой [21]. Корреляционная взаимосвязь между измерениями информационной составляющей для фильтров Баттерворта составило  $r > 0,99$  и между измерениями неинформационной составляющей составило  $r > 0,99$  соответственно.

Установленная значительная корреляция измерений  $r > 0,99$  для метода фильтрации [15] в сравнении с методами фильтрации Бесселя и Чебышева объясняется тем, что обеспечивает фильтрацию сигнала при минимальных искажениях информационной составляющей и позволяет получить на выходе сигнал, идентичный с его исходной формой, в равной степени как и для неинформационной (помеховой) составляющей сигнала.

**Обсуждение экспериментов.** Одной из главных и важных задач обработки сигналов АЭ является фильтрация шумовой помехи для выделения неинформационной составляющей и определения

раметров сигналов с целью вычисления вторичных диагностических показателей акустической эмиссии. Повышение достоверности диагностики возможно лишь за счет уменьшения влияния шумовой помехи, зависящей от эффективности применяемых методов цифровой фильтрации.

В данном исследовании показано, что среди полиномиальных цифровых методов фильтрации сигналов АЭ высокую точность обработки и помехоустойчивость способен обеспечить метод фильтрации на основе полинома Баттерворта, что обуславливается его особенностями — данный метод фильтрации не порождает пульсаций, как в полосе пропускания сигнала, так и в полосе подавления помех, а коэффициент его усиления, в сравнении с фильтрами Бесселя и Чебышева, всегда стабилен, вне зависимости от его порядка. Ранее эффективность метода фильтрации на основе полинома Баттерворта при сравнении с фильтрами Бесселя, Чебышева для обработки сложно структурированных сигналов также отмечалась в работах [22].

Научная новизна данного исследования заключается в том, что при применении цифровых фильтров на основе полиномиальной модели выявлено улучшение избирательности системы обработки сигнала АЭ по отношению к шумовой помехе (при сравнении с ближайшими аналогами). Ранее применение полиномиальной модели для улучшения избирательности системы цифровой обработки сигналов АЭ не рассматривалось.

**Заключение.** Представлены результаты оценки эффективности методов обработки сигналов АЭ при полиномиальной цифровой фильтрации. Для повышения эффективности обработки сигналов АЭ, а именно точности и помехоустойчивости, предложено использовать метод высокочастотной фильтрации полиномом Баттерворта. Предложенный метод позволяет при минимальных искажениях отфильтровать информационную составляющую сигнала. Для компенсации вносимых искажений полиномиальными фильтрами разработана и предложена схема двунаправленной обработки сигналов АЭ. Показано, что использование предлагаемого метода фильтрации, при сравнении с ближайшими аналогами, может в значительной степени повысить эффективность обработки сигнала по точности и помехоустойчивости.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке научного проекта № 620164.

### Библиографический список

1. He Y. 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. P. 107146. DOI: 10.1016/j.ymsp.2020.107146.
2. Zhao L., Kang L., Yao S. Research and application of acoustic emission signal processing technology // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 984–993. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2886095.
3. Бехер С. А., Бобров А. Л. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии / Под общ. ред. Л. Н. Степановой. Новосибирск, 2013. 145 с.
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. д-ра техн. наук. Томск, 2017. 36 с.
5. Степанова К. А. Разработка методики акустико-эмиссионного контроля дефектообразования в процессе формирования соединения сваркой трением с перемешиванием: автореф. канд. тех. наук. Санкт-Петербург, 2020. 20 с.
6. Кузьмин А. Н., Иноземцев В. В., Прохоровский А. С. [и др.]. Технология беспороговой регистрации данных акустической эмиссии при контроле промышленных объектов // *Химическая техника*. 2018. № 3. С. 10–17.
7. Измайлова Е. В. Информационно-измерительная система и метод контроля трубопроводов на основе вейвлет-фильтрации сигналов акустической эмиссии: автореф. канд. тех. наук. Казань, 2013. 16 с.
8. Kharrat M. A. 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. P. 1038–1055. DOI:10.1016/J.YMSSP.2015.08.028.
9. 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. P. 1850012. DOI: 10.1142/S0219691318500121.
10. Beale C., Niezrecki C., Inalpolat M. An adaptive wavelet packet denoising algorithm for enhanced active acoustic damage detection from wind turbine blades // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 142. P. 106754. DOI: 10.1016/j.ymsp.2020.106754.
11. Barat V., Borodin Y., Kuzmin A. Intelligent AE signal filtering methods // *Journal of Acoustic Emission*. 2010. Vol. 28. P. 109–119.
12. Ferrando C., Juan L. A Novel Machine Learning-Based Methodology for Tool Wear Prediction Using Acoustic Emission Signals // *Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 5984. DOI: 10.3390/s21175984.
13. Barile C. Acoustic emission descriptors for the mechanical behavior of selective laser melted samples: An innovative approach // *Mechanics of Materials*. 2020. Vol. 148. P. 103448. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103448.
14. Makhutov N. A., Vasiliev I. E., Chernov D. V. [et al.] Influence of the passband of frequency filters on the parameters of acoustic emission pulses // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. Vol. 55. P. 173–180. DOI: 10.1134/S1061830919030082.
15. 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*, January 25–28. 2022. P. 1320–1326.
16. Щегольский И. А. Синтез рекурсивных цифровых фильтров методами оптимизации на основе полиномиальной аппроксимации: автореф. канд. техн. наук. Томск, 2004. 20 с.
17. Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А. Формирование моделей информационных составляющих для оценки спектрально-статистических характеристик и влияние параметра фильтров на точность измерения сигналов акустической эмиссии // *Сб. тез. докл. конгресса молодых ученых*. Санкт-Петербург: Изд-во ИТМО, 2022. 2 с.
18. Paarman L. D. Design and analysis of analog filters: a signal processing perspective. New-York: Kluwer academic publishers, 2001. 440 p.
19. Richard L. G. Digital signal processing. New Jersey: Upper Saddle, 2006. 656 p.
20. 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 // *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, January 26–29. 2021. P. 1590–1595.
21. Салин В. Н., Чурилова Э. Ю. Практикум по курсу «Статистика». Москва: Перспектива, 2002. 188 с.
22. Avdeeva D. K., Kazakov V. Y., Natalinova N. M. [et al.], 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. P. 1 – 10.

**АЛТАЙ Ельдос**, инженер факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 4708-3485

AuthorID (РИНЦ): 819169

ORCID: 0000-0002-3736-0291

AuthorID (SCOPUS): 57194240500

Адрес для переписки: aeldos@inbox.ru

**ФЕДОРОВ Алексей Владимирович**, доктор технических наук, доцент факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 2489-4043

AuthorID (РИНЦ): 986085

AuthorID (SCOPUS): 57219346304

Адрес для переписки: avfedorov@itmo.ru

**СТЕПАНОВА Ксения Андреевна**, кандидат технических наук, ассистент факультета систем управления

и робототехники Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 7861-9935

AuthorID (РИНЦ): 1116079

AuthorID (SCOPUS): 57212027443

Адрес для переписки: ledy.xs93@yandex.ru

**КУЗИВАНОВ Дмитрий Олегович**, студент гр. R42773 направления подготовки «Системы и технологии цифрового производства», инженер факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.

Адрес для переписки: kuzivanovdmitry@gmail.com

#### Для цитирования

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 (183). С. 128 – 134. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-128-134.

Статья поступила в редакцию 04.04.2022 г.

© Е. Алтай, А. В. Федоров, К. А. Степанова,

Д. О. Кузиванов