
**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ,
ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

**INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING THE NATURAL
ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS**

УДК 620.179.17
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-735-746

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧИМОСТИ
СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ,
ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ВТОРИЧНЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Е. АЛТАЙ*, А. В. ФЕДОРОВ, К. А. СТЕПАНОВА, Д. О. КУЗИВАНОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
*
aeldos@inbox.ru

Аннотация. Статистическая оценка вторичных диагностических показателей акустической эмиссии (АЭ) является неотъемлемой частью процесса обработки сигнала после применения методов фильтрации. Представлены результаты анализа параметров АЭ с использованием метода полиномиальной цифровой двунаправленной фильтрации помехи АЭ, полученной при АЭ-контроле двух инструментов в процессе фрезерования. Проанализирована работоспособность данного метода фильтрации при определении различия между исходными и отфильтрованными сигналами АЭ. Выделены фрагменты информационной и помеховой составляющих сигнала, что позволило экспериментально определить показатель сигнал/помеха. Установлено, что использование полиномиального цифрового метода двунаправленной фильтрации повышает качество обработки сигнала и позволяет обнаружить статистически значимые корреляционные связи между параметрами АЭ-сигналов при контроле дефектного и бездефектного инструмента. Линейной регрессионной моделью охарактеризована зависимость, описывающая отношение вторичных диагностических показателей дефектного инструмента к показателям бездефектного инструмента при АЭ-контроле.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, обработка сигнала, фильтрация помехи, параметры акустической эмиссии, диагностические показатели, статистическая обработка, отношение сигнал/помеха

Ссылка для цитирования: Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А., Кузиванов Д. О. Экспериментальное определение значимости статистической оценки параметров, характеризующих вторичные диагностические показатели акустической эмиссии // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 10. С. 735—746. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-735-746.

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE SIGNIFICANCE OF STATISTICAL EVALUATION
OF PARAMETERS CHARACTERIZING SECONDARY DIAGNOSTIC INDICATORS
OF ACOUSTIC EMISSION**

Y. Altay*, A. V. Fedorov, K. A. Stepanova, D. O. Kuzivanov

ITMO University, St. Petersburg, Russia
*
aeldos@inbox.ru

Abstract. Statistical evaluation of secondary diagnostic indicators of acoustic emission (AE) is an integral part of signal processing after applying filtering methods. AE parameters of acoustic noise obtained while monitoring AE from two tools in the milling process are analyzed using the method of polynomial digital bidirectional filtering. The efficiency of this filtering method is examined by determining the difference between the original and filtered AE signals. Fragments of the information and noise components of the signal are separated to allow for experimental determination of the signal/interference indicator. It is shown that the use of the polynomial digital method of bidirectional filtering improves the

quality of signal processing and makes it possible to detect statistically significant correlations between the parameters of AE signals when testing a defective and defect-free instruments. A linear regression model is applied to describe the ratio of secondary diagnostic indicators of a defective instrument to indicators of a defect-free tool during AE monitoring.

Keywords: acoustic emission, signal processing, noise filtering, acoustic emission parameters, diagnostic indicators, statistical processing, signal-to-noise ratio

For citation: Altay Y., Fedorov A. V., Stepanova K. A., Kuzivanov D. O. Experimental determination of the significance of statistical evaluation of parameters characterizing secondary diagnostic indicators of acoustic emission. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 10. P. 735—746 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-735-746.

Введение. Статистическая оценка параметров сигнала акустической эмиссии (АЭ) на сегодняшний день является одним из важнейших этапов при анализе данных измерений после применения методов первичной обработки сигнала, а именно его фильтрации [1—4]. Это обусловлено тем, что составляющая помехи АЭ-сигнала снижает точность оценки первичных и вторичных диагностических показателей, характеризующих совокупность признаков, с помощью которых можно определить состояние объекта контроля (ОК). Повышение точности оценки показателей и, следовательно достоверность АЭ-диагностики ОК, главным образом зависит от эффективности применяемых методов первичной обработки сигнала (фильтрации) [5]. Недостаточное ослабление помеховой составляющей сигнала существенно снижает точность оценки показателей АЭ [1—4, 6, 7], поэтому применение методов фильтрации значительно для вторичной обработки сигналов при оценке диагностических показателей АЭ.

В настоящей статье, в отличие от работ [5, 8—10], при экспериментальной апробации разработанного цифрового фильтра [8, 10], вырабатывающего оценку по критериям максимума отношения сигнал/помеха и минимума среднеквадратичного отклонения сигнала, представлены результаты первичной обработки зашумленных натуральных сигналов и статистическая оценка специфических параметров АЭ. Для фильтра в [8, 10] предложено использовать понятие „фильтр вырабатывает“, согласно введенной в монографии Б.Р. Левина [11] и общепринятой терминологии. В настоящей статье понятие „фильтр вырабатывает“ используется для определения возможности фильтра в обработке сигналов АЭ.

Цель исследований — повышение результативности обработки сигналов АЭ за счет цифровой полиномиальной фильтрации для оценки статистической различимости зашумленных и отфильтрованных сигналов и вычисления вторичных диагностических показателей АЭ и их значимости.

Исходные данные. В исследовании использованы сигналы, зарегистрированные в процессе фрезерования пластины из алюминиевого сплава двумя инструментальными твердосплавными фрезами. При этом одна из фрез была бездефектной, а у другой был дефект в виде скола резьбы на конце рабочей части инструмента.

В ходе эксперимента, который проводился в Университете ИТМО, были записаны и оцифрованы результаты регистрации 48 сигналов (из них 24 для бездефектной фрезы и 24 — для фрезы с дефектом) с помощью сертифицированной измерительной АЭ-системы США. Все сигналы содержали не менее 4000 отсчетов (q) измерений при частоте дискретизации 4 МГц и регистрировались в единых условиях в отсутствие внешних факторов среды, влияющих на результаты эксперимента. Полученные результаты регистрации обработаны с применением разработанной системы обработки сигнала АЭ на основе схемы двунаправленной фильтрации для выделения как информационной составляющей сигналов (s), так и (n) помехи [8, 10].

Обработка результатов регистрации сигналов акустической эмиссии. При проведении экспериментальных исследований обработка результатов регистрации проводилась в два этапа. На первом этапе с помощью дискретного преобразования Фурье получена эмпирическая оценка частоты зарегистрированных сигналов для обоснования частоты среза настраиваемого

фильтра. На втором этапе в программном пакете MatLab выполнена первичная обработка сигнала и вычислены параметры АЭ для дальнейшей статистической обработки.

На рис. 1 представлены результаты спектрального анализа зашумленного сигнала АЭ при контроле бездефектного (а) и дефектного (б) инструмента.

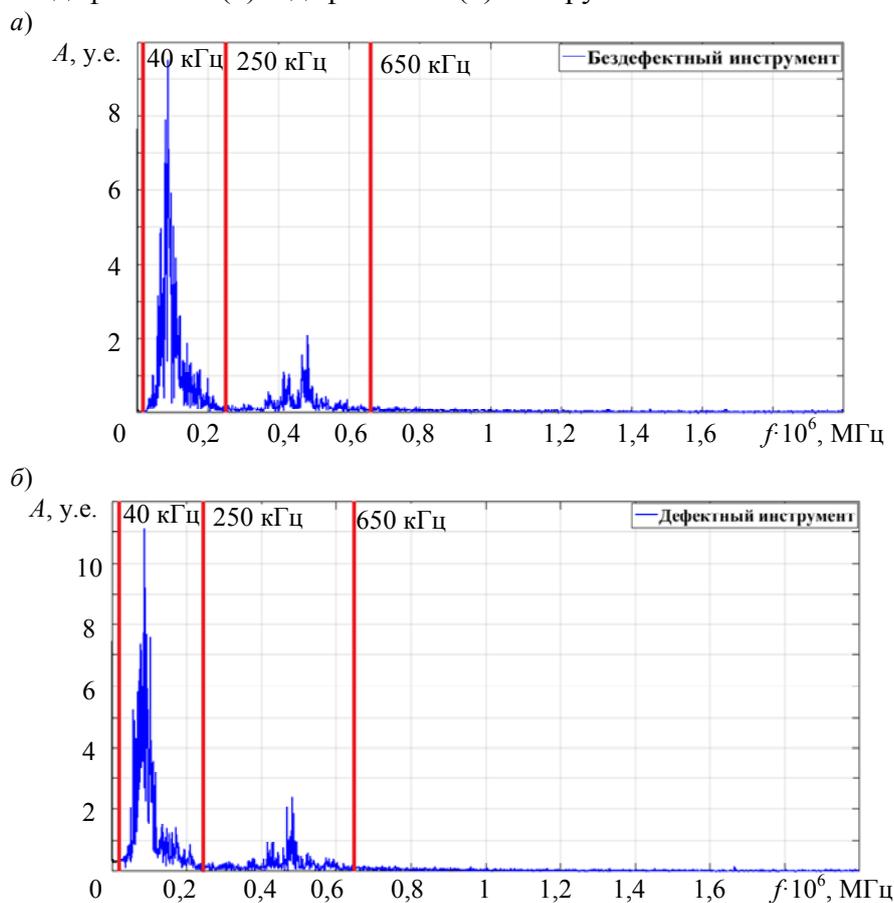


Рис. 1

Анализ спектров показал, что амплитуда сигнала при контроле дефектного инструмента превышает амплитуду сигнала при контроле бездефектного примерно на 1,5 у. е., а амплитуда помеховой составляющей сигнала, расположенной выше спектра информационного сигнала, имеет незначительную вариабельность в зависимости от частоты.

Результаты первого этапа обработки результатов показали, что частота натуральных зашумленных сигналов для бездефектного и дефектного инструмента идентифицировалась в диапазоне 40—650 кГц. При этом информационная составляющая расположена в интервале от 40 до 250 кГц, а помеховая — от 250 до 650 кГц. Полученные оценки совпадают с имеющимся экспериментальными данными [12], где отмечено, что сигналы АЭ, полученные во время фрезерования, могут находиться в диапазоне частот от 40 до 350 кГц [12]. Это позволяет обосновать выбор верхней границы (а именно 250 кГц) частотного диапазона информационной составляющей сигнала АЭ для настройки фильтра верхних частот (ФВЧ) [8] с целью ослабления влияния помехи.

Для обработки результатов регистрации сигнала АЭ характеристики цифрового фильтра проанализированы при помощи амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и нуль-поллюсной диаграммы (НПД) [8]. Результат АЧХ фильтра показал, что ФВЧ на частоте среза 250 кГц без пульсаций, монотонный и стабильный, как в полосе пропускания сигнала, так и в полосе подавления помехи, а корни структуры передаточной функции фильтра расположены внутри окружности единичного радиуса на НПД и устойчивы. Все проанализированные

характеристики спроектированного фильтра дают значимое преимущество для выделения не только информационной, но и помеховой составляющей.

Результаты второго этапа обработки результатов показали, что метод фильтрации на основе двунаправленного ФВЧ, настроенный на частоту среза 250 кГц, позволяет выделить как информационную составляющую сигналов АЭ, так и помеховую. Для лучшей визуализации и сравнения результатов регистрации на рис. 2—4 выделенные сигналы информационной и помеховой составляющих бездефектного (а) и дефектного (б) инструмента представлены по одному образцу.

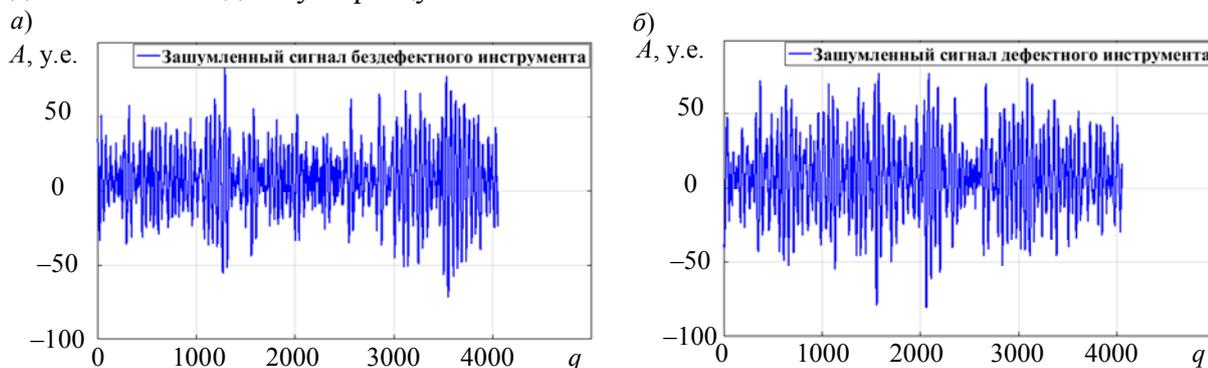


Рис. 2

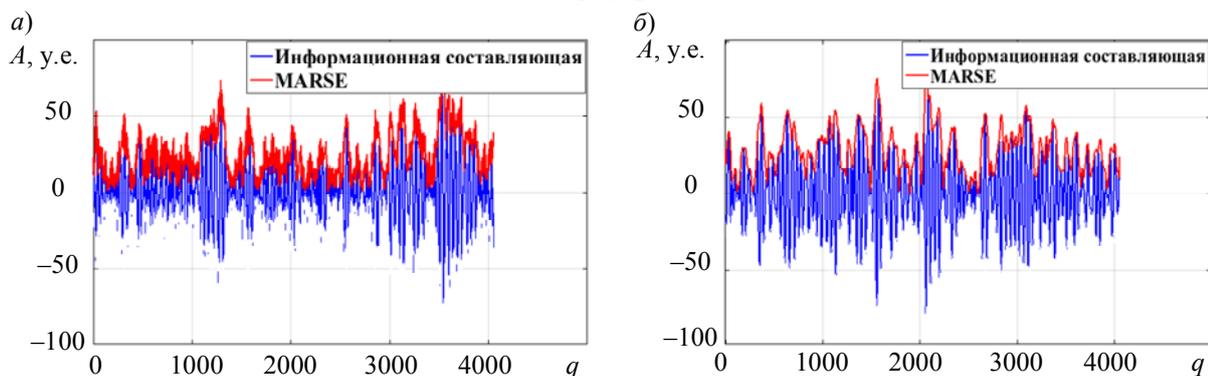


Рис. 3

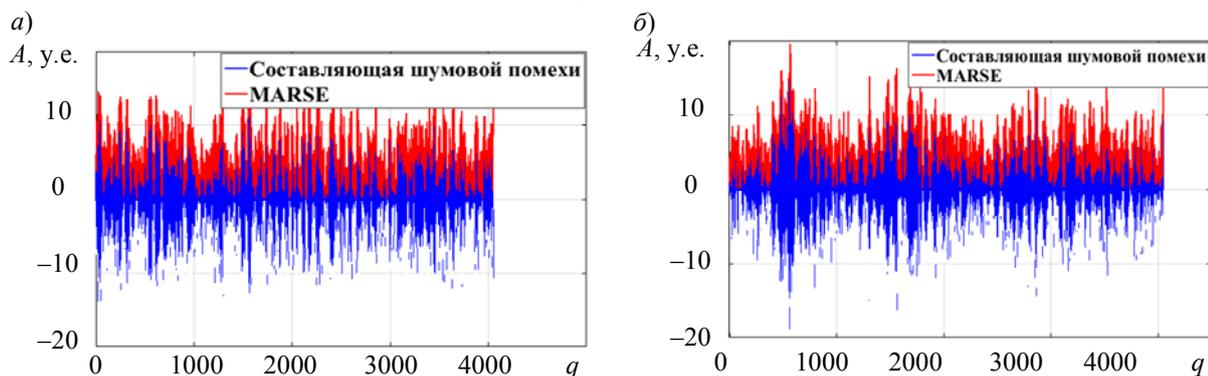


Рис. 4

Сравнительный анализ форм сигналов, представленных на рис. 2—4, показал, что формы сигналов АЭ дефектного и бездефектного инструмента различаются. Информационная составляющая бездефектного инструмента АЭ (рис. 3, а) заметно отличается от информационной составляющей дефектного инструмента (рис. 3, б), а форма сигнала подобна явлению АЭ при сравнении с зашумленным сигналом (рис. 2), где информационная составляющая замаскирована помеховой (рис. 4). Различимость зашумленных и отфильтрованных сигналов, полученных при контроле дефектного и бездефектного инструмента, была проанализирована при помощи метода статистического анализа.

Статистический анализ результатов регистрации и обработки. Для описания результатов измерения и их обработки использовался двойной дескриптивный анализ [13]. Этот подход позволяет охарактеризовать весь набор измеряемых данных и выбрать метод статистики для оценки различимости отсчетов между зашумленными и отфильтрованными сигналами при отличии данных измерения от гауссова закона распределения. Зашумленные и отфильтрованные отсчеты сигналов представлены в виде среднего арифметического значения (u), стандартных отклонений (σ), медианы (Me) и квартилей ($Q1—Q3$). Оценка распределения отсчетов сигналов проводилась на основе расчета критерия Лиллиефорса, используемого для измерений более чем $q>50$.

Дескриптивный анализ показал различие в значениях u и Me в отсчетах исходных и отфильтрованных сигналов как для бездефектного, так и для дефектного инструмента. Значения квартилей $Q1—Q3$ медианы характеризуют существенный разброс в зашумленном наборе, по сравнению с тем же набором в отфильтрованных сигналах. Наличие такого разброса $Q1—Q3$ в квартилях $x_i(q)$ и $s_i(q)$ относительно их медианы следует характеризовать влиянием помеховой составляющей. Различие в значениях показателей u и Me говорит об отличии данных от гауссова закона распределения, так как $u \neq Me$, о чем и свидетельствует p -уровень значимости (p -значение) критерия Лиллиефорса (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Статистические характеристики анализируемых сигналов АЭ для бездефектного инструмента

№	Показатели зашумленных сигналов АЭ, $x_i(q)$			Показатели информационной составляющей сигналов АЭ, $s_i(q)$			
	$u \pm \sigma$, мВ ($q>4000$)	$Me [Q1; Q3]$, мВ ($q>4000$)	p^*	$u \pm \sigma$, мВ ($q>4000$)	$Me [Q1; Q3]$, мВ ($q>4000$)	p^{**}	
1	7,688±22,195	8,000 [-6,000; 22,000]	0,01	0,132±19,746	0,225 [-12,359; 12,298]	0,01	
2	0,386±30,383	0,000 [-13,000; 14,000]		0,019±24,248	0,319 [-10,137; 10,869]		
3	6,612±27,199	6,000 [-5,000; 18,000]		0,142±20,787	0,086 [-8,329; 8,583]		
4	2,789±24,016	2,000 [-8,000; 15,000]		0,115±17,429	0,216 [-7,824; 8,170]		
5	7,700±19,366	7,000 [-5,000; 21,000]		0,171±16,967	0,190 [-11,380; 11,607]		
6	0,379±83,416	0,000 [-29,000; 31,000]		0,050±63,290	0,150 [-22,233; 23,306]		0,006
7	6,637±61,915	6,000 [-22,000; 34,000]		0,088±44,326	0,287 [-21,730; 21,563]		0,01
8	2,750±66,162	4,000 [-27,000; 31,000]		0,039±45,297	1,092 [-21,281; 19,982]		
9	7,109±45,929	3,000 [-65,000; 71,000]		0,282±41,616	0,838 [-28,184; 27,916]		0,003
10	0,243±170,953	2,000 [-68,000; 71,000]		0,01	0,019±121,385		0,236 [-50,087; 50,220]
11	6,583±141,891	7,000 [-44,000; 57,000]	0,029±87,488		0,018 [-33,948; 34,541]		
12	2,645±166,862	3,000 [-65,000; 71,000]	0,084±105,629		0,369 [-45,225; 44,769]		
13	7,002±61,192	7,000 [-32,000; 45,000]	0,612±56,145		0,420 [-36,050; 34,376]		
14	0,096±303,403	3,000 [-67,000; 66,000]	0,248±194,055		1,827 [-49,695; 47,714]		
15	6,503±246,515	4,000 [-48,000; 63,000]	0,027±160,821		3,109 [-40,571; 43,224]		
16	2,793±253,476	3,000 [-63,000; 68,000]	0,655±174,735		1,019 [-44,728; 46,950]		
17	7,456±101,098	6,000 [-62,000; 77,000]	0,05		0,273±91,886	0,681 [-64,492; 64,131]	0,008
18	0,236±196,168	2,000 [-79,000; 77,000]	0,01	0,628±141,708	0,184 [-58,479; 57,888]	0,01	
19	6,781±126,663	6,000 [-49,000; 61,000]		0,091±92,403	0,515 [-41,952; 42,607]		
20	2,784±174,061	3,000 [-58,000; 61,000]		0,158±114,559	0,297 [-40,512; 41,193]		
21	6,827±88,822	8,000 [-53,000; 66,000]		0,388±81,595	1,126 [-54,714; 54,642]		0,007
22	0,354±164,777	0,000 [-67,000; 69,000]		0,174±126,609	1,152 [-51,558; 52,033]		0,01
23	6,707±131,671	6,000 [-50,000; 63,000]		0,176±91,701	1,174 [-41,878; 40,518]		
24	2,665±123,353	2,000 [-47,000; 51,000]		0,514±86,873	0,938 [-35,783; 34,382]		
p^{***}	<0,05						

Примечание.

p^* — значение критерия Лиллиефорса для зашумленных данных

p^{**} — значение критерия Лиллиефорса для данных на промежутке „до и после обработки“

p^{***} — значение критерия Вилкоксона для данных на промежутке „до и после обработки“

Статистические характеристики анализируемых сигналов АЭ для дефектного инструмента

№	Показатели зашумленных сигналов АЭ, $x_i(q)$			Показатели информационной составляющей сигналов АЭ, $s_i(q)$		
	$u \pm \sigma$, мВ ($q > 4000$)	Me [Q1; Q3], мВ ($q > 4000$)	p^*	$u \pm \sigma$, мВ ($q > 4000$)	Me [Q1; Q3], мВ ($q > 4000$)	p^{**}
1	7,453±25,903	7,000 [-10,000; 25,000]	0,05	0,182±23,142	0,092 [-15,565; 15,8152]	0,003
2	0,301±23,508	0,000 [-7,000; 8,000]	0,01	0,021±16,958	0,072 [-5,226; 5,1795]	0,01
3	6,555±22,363	6,000 [-1,000; 15,000]		0,114±17,265	0,168 [-5,442; 5,9771]	
4	2,746±28,446	3,000 [-9,000; 14,000]		0,109±22,754	0,046 [-9,315; 9,3571]	0,03
5	7,594±22,797	8,000 [-8,000; 23,000]		0,157±20,380	0,295 [-13,037; 13,337]	
6	0,252±52,626	0,000 [-13,000; 13,000]		0,044±27,092	0,038 [-7,973; 7,419]	0,01
7	6,568±40,157	6,000 [-7,000; 19,000]		0,250±22,565	0,298 [-8,702; 9,012]	
8	2,768±57,947	2,000 [-14,000; 19,000]		0,227±39,480	0,082 [-12,304; 11,921]	0,05
9	7,169±52,618	6,000 [-28,000; 43,000]		0,289±47,846	1,343 [-31,774; 31,932]	
10	0,325±230,841	1,000 [-53,000; 50,000]		0,236±185,208	0,282 [-40,511; 42,160]	0,01
11	6,593±319,779	3,000 [-51,000; 56,000]		0,196±270,363	2,135 [-49,789; 42,917]	
12	1,896±435,258	2,000 [-93,000; 100,000]	0,067±369,327	0,858 [-80,774; 82,479]		
13	7,171±53,116	7,000 [-31,000; 44,000]	0,026±48,130	0,649 [-34,573; 33,655]		
14	0,238±213,056	0,000 [-57,000; 61,000]	0,353±135,529	0,499 [-41,455; 41,035]		
15	6,704±205,719	7,000 [-48,000; 59,000]	0,422±142,680	0,362 [-41,742; 39,424]		
16	2,697±267,238	3,000 [-71,000; 76,000]	0,224±192,954	1,127 [-58,596; 58,658]		
17	7,115±74,329	7,000 [-44,000; 59,000]	0,344±67,582	0,123 [-45,765; 48,008]	0,004	
18	0,188±198,178	0,000 [-60,000; 64,000]	0,310±129,497	1,217 [-47,301; 46,188]	0,01	
19	6,623±180,076	6,000 [-57,000; 67,000]	0,819±128,028	1,921 [-47,825; 45,633]		
20	2,636±262,964	3,000 [-82,000; 93,000]	0,382±200,546	1,121 [-70,912; 73,355]		
21	6,845±90,523	10,000 [-56,000; 68,000]	0,315±81,506	2,608 [-56,710; 55,919]		
22	0,702±390,122	1,000 [-135,000; 126,000]	0,709±212,159	0,246 [-94,807; 90,669]		
23	5,066±404,508	3,000 [-116,000; 127,000]	0,547±322,293	0,600 [-91,822; 95,613]		
24	1,400±487,264	8,000 [-170,000; 177,000]	0,702±403,611	6,032 [-135,804; 145,132]		
p^{***}	0,05					

Примечание.

p^* — значение критерия Лиллиефорса для зашумленных сигналов

p^{**} — значение критерия Лиллиефорса для информационной составляющей сигналов

p^{***} — значение критерия Вилкоксона для данных на промежутке „до и после обработки“

Соответственно для сопоставления отсчетов зашумленных и отфильтрованных сигналов выбран непараметрический критерий Вилкоксона. При этом, если $p < 0,05$, принимается гипотеза об ослаблении влияния составляющей шумовой помехи на информационный сигнал, а сигналы являются различимыми; если $p > 0,05$, то гипотеза отвергается. Результаты показали, что значение данного критерия меньше порога $< 0,05$, это позволяет утверждать о различиях между отсчетами зашумленных и отфильтрованных сигналов при цифровой фильтрации.

В работе [14] отмечалось, что при проведении диагностического АЭ-исследования ОК основную долю информационного сигнала составляет помеха, энергия которой сопоставима с энергией информационного сигнала или выше ее. Поэтому в настоящей работе энергетическая составляющая, как информационная, так и помеховая, рассматриваемых сигналов оценивается с помощью показателя среднеквадратического значения:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}(a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_q^2)},$$

где N — число отсчетов сигналов, a — индивидуальные значения отсчета сигнала до q .

Величина этого показателя может интерпретироваться как мгновенная энергия процесса, порождающего анализируемый сигнал АЭ [4, 12]. Вычисленные значения показателя для

информационной составляющей сигнала и шумовой помехи проиллюстрированы на диаграмме Тьюки (рис. 5, а — бездефектный инструмент; б — дефектный).

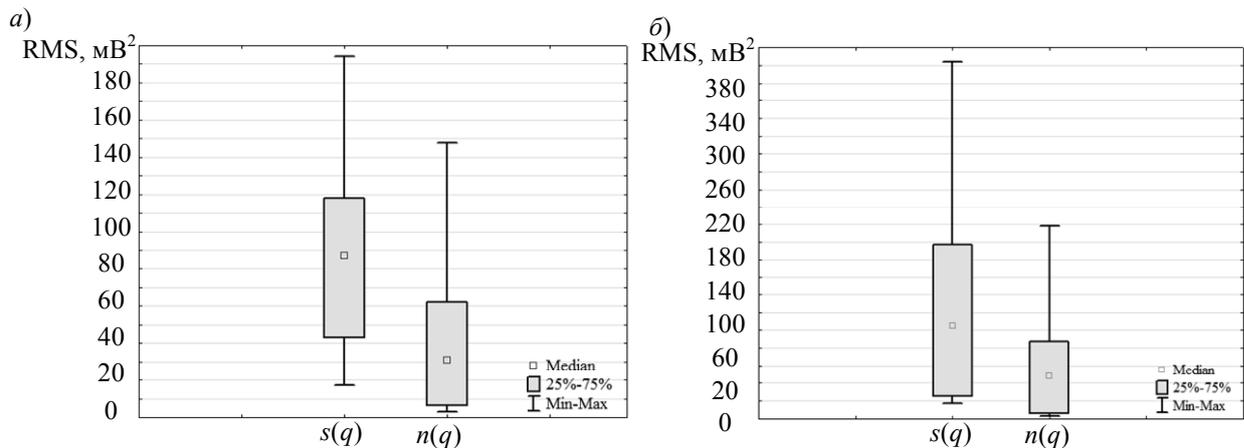


Рис. 5

Сравнивая результаты обработки, представленные на рис. 5, можно заметить, что амплитуда информационной составляющей $s(q)$ в два раза выше амплитуды помеховой составляющей $n(q)$. При контроле бездефектного инструмента значения медиан среднеквадратического значения информационной составляющей: $\text{RMS}_{\text{Me}} = 87,171$; помеховой: $\text{RMS}_{\text{Me}} = 30,776 \text{ мВ}^2$. При контроле дефектного инструмента медиана среднеквадратического значения информационной составляющей: $\text{RMS}_{\text{Me}} = 104,756$; шумовой помехи $\text{RMS}_{\text{Me}} = 48,283 \text{ мВ}^2$. Согласно рис. 5 и представленным значениям медианы, энергия информационной составляющей сигналов в два раза выше энергии шумовой помехи ($\text{RMS}_{s(q)} > \text{RMS}_{n(q)}$). Это также подтверждается рис. 1, амплитуда информационной составляющей сигнала на котором значительно превышает амплитуду помеховой составляющей.

Другим критерием оценки сопоставимости энергии полезного сигнала и помехи является экспериментальный показатель отношения сигнал/помеха (SNR) [4, 8], вычисляемый как отношение среднеквадратического значения сигнала к среднеквадратическому значению амплитуды помехи для рассматриваемых сигналов i на выходе цифрового фильтра [9]:

$$\text{SNR} = 20 \lg \left(\frac{s_i^2(q)}{n_i^2(q)} \right).$$

Вычисленные значения данного показателя для сигналов, полученных при контроле бездефектного и дефектного инструмента, проиллюстрированы в диаграмме Тьюки на рис. 6.

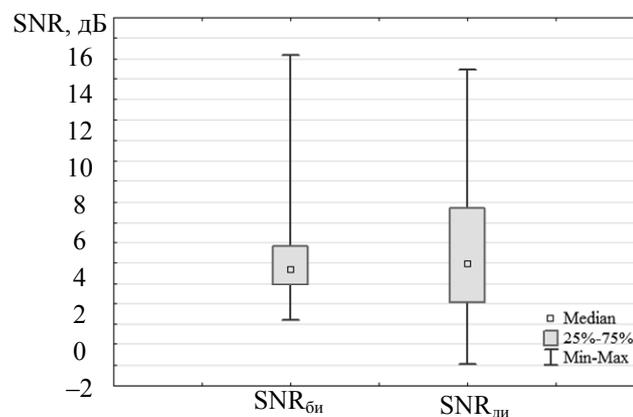


Рис. 6

Из рис. 6 следует, что медиана показателя SNR при контроле бездефектного инструмента составила $SNR_{Me} = 3,661$ дБ, а при контроле дефектного инструмента — $SNR_{Me} = 3,931$ дБ. Значение медианы показателя SNR выше нуля служит информацией о превышении амплитудой информационного сигнала амплитуды помехи. Высокие значения этого показателя характеризуют устойчивость фильтров к влияющей помехе при реализации полиномиального цифрового фильтра [8, 10]. Согласно этой оценке, дальнейший анализ параметров информационной составляющей проводился на основе вычисления вторичных диагностических показателей АЭ [1, 2].

Статистическая оценка параметров акустической эмиссии. При оценке параметров сигналов наилучшую корреляцию со свойствами источника АЭ имеют амплитудные параметры, описывающие энергетическое содержание акустических явлений [1, 2, 15]. В работах [1—4, 15] использовано значительное количество специфичных статистических показателей для оценки параметров АЭ. Для этой оценки часто выбирают такие показатели, как амплитуда сигнала (U), размах сигнала (между значениями максимума и минимума амплитуды, ΔU), среднеквадратическое отклонение (СКО, σ_U), среднеквадратическое значение сигнала (U_{RMS}), энергетический параметр (площадь огибающей сигнала, MARSE). Процедура вычисления перечисленных параметров с целью обнаружения статистически различных, но значимых связей между параметрами дефектного и бездефектного инструмента может носить комплексный характер. В этой связи совместная оценка перечисленных выше параметров АЭ является актуальной.

Анализ корреляционной взаимосвязи показал, что между контролируемыми параметрами АЭ бездефектного и дефектного инструмента есть статистически значимая корреляция, отличающаяся от нуля. В проанализированном наборе измерений наибольшая корреляция наблюдается у параметра $r_p = 0,595$ при сравнении с параметрами — $r_{СКО} = 0,526$, $r_A = 0,527$, $r_{RMS} = 0,526$, $r_{MARSE} = 0,525$. Используя оценочную шкалу Чеддока для интерпретации коэффициента корреляции, следует отметить, что параметрам $r_{СКО}$, r_A , r_p , r_{RMS} , r_{MARSE} свойственна прямая и заметная ($r_{0,5-0,7}$) корреляционная взаимосвязь. Установленная корреляция для данных параметров при $r > 0,5$ объясняется различием в значениях параметров информационной составляющей сигналов контролируемого бездефектного и дефектного инструмента.

Ранее в работах [2, 15] отмечалось, что вычисленные в настоящей статье параметры являются устойчивыми мешающими факторами среды и позволяют обнаружить корреляционные взаимосвязи параметров источника АЭ. В рамках данного исследования при использовании фильтра [8, 10] также обнаружены статистически значимые корреляции измерений ($p < 0,05$), характеризующие неслучайность полученной взаимосвязи. При ослаблении помеховой составляющей высокая корреляция результата измерений, а именно $r \sim 0,9$, может наблюдаться в информационной составляющей, зарегистрированной между парными преобразователями сигналов АЭ от единого источника [16], аналогично работам [2, 15].

Модель, характеризующая статистическую различимость параметров АЭ бездефектного и дефектного инструмента, разрабатывалась с помощью метода машинного обучения — линейной регрессии. Линейная регрессия является работоспособным и высокочувствительным к анализируемым данным методом, не требующим специального обучения выборки объекта контроля [17]. Проведенные на основе линейной регрессии исследования показали, что наиболее чувствительны к изменению модели показателей АЭ сигналов дефектного инструмента параметры σ_U , ΔU и MARSE. Данные результаты представлены на рис. 7—9 в виде диаграммы Тьюки (а) и регрессионной зависимости (б).

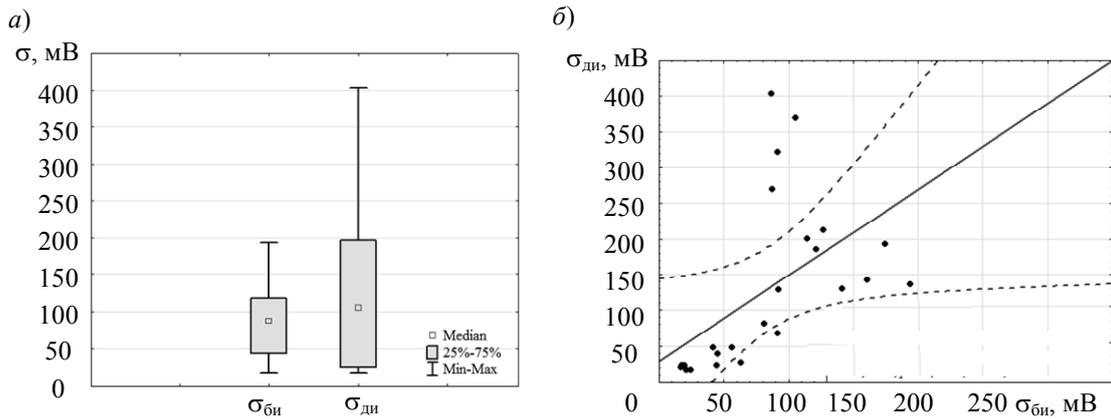


Рис. 7

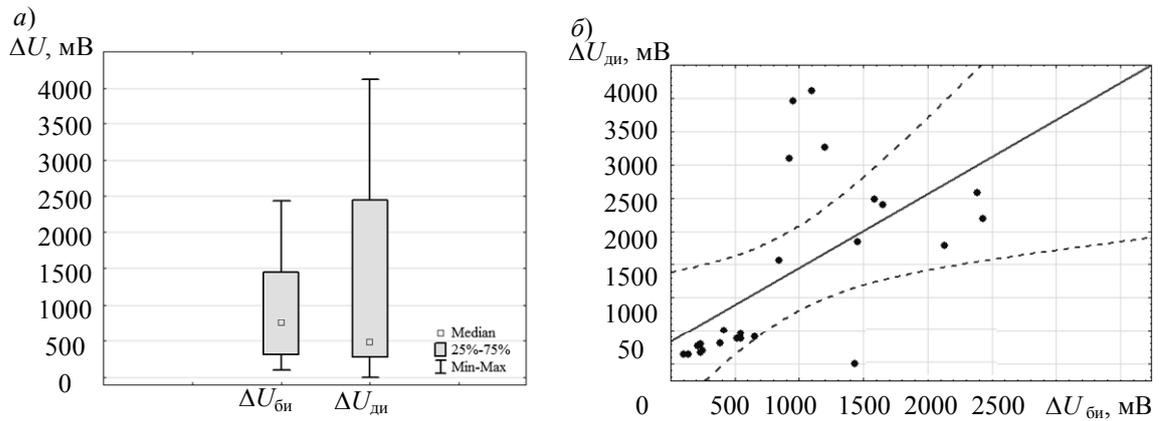


Рис. 8

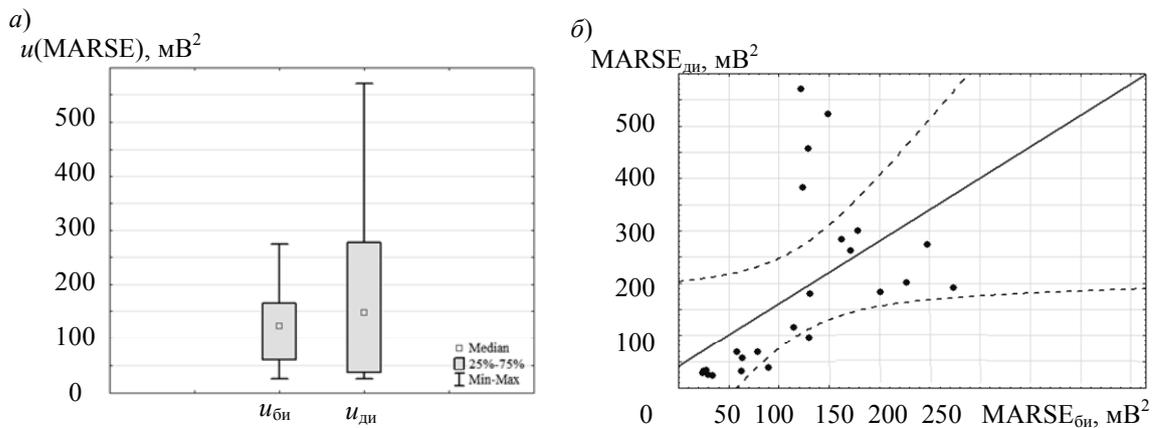


Рис. 9

Для оценки адекватности построенной регрессионной зависимости рассчитаны коэффициенты детерминации R^2 и корреляции r , а также уровня значимости p модели:

$$y_{\sigma, \text{дн}} = 29,088 + 1,201 \cdot \sigma_{\text{бн}} \text{ при } r = 0,526, R^2 = 0,277, p = 0,0082 \text{ (см. рис. 7);}$$

$$y_{\Delta U, \text{дн}} = 330,841 + 1,116 \cdot \Delta U_{\text{бн}} \text{ при } r = 0,595, R^2 = 0,354, p = 0,002 \text{ (см. рис. 8);}$$

$$y_{\text{MARSE}, \text{дн}} = 330,841 + 1,116 \cdot \text{MARSE}_{\text{бн}} \text{ при } r = 0,525, R^2 = 0,276, p = 0,008 \text{ (см. рис. 9).}$$

Из рис. 7—9 видно, что между контролируемыми параметрами сигналов бездефектного и дефектного инструмента существует также прямая корреляционная связь. Величина коэффициента детерминации R^2 построенной модели объясняет наблюдаемую дисперсию предиктора дефектного инструмента. Полученные коэффициенты с p -значением менее 0,01 считаются статистически значимыми для доверительного интервала с надежностью 0,99, т.е. свя-

занные параметры АЭ могут быть значимыми предикторами процессов дефектообразования, происходящих в инструменте с вероятностью надежности доверительного интервала. Накопленный на сегодняшний день экспериментальный материал подтверждает возможность применения вычисленных параметров для предиктивного анализа [18] технического состояния объектов контроля.

Заключение. Статья посвящена статистической оценке параметров АЭ при реализации метода обработки, основанного на двунаправленной полиномиальной цифровой фильтрации. Для подтверждения работоспособности метода получены результаты фильтрации зарегистрированных сигналов АЭ во время процесса фрезерования двумя инструментами. Показана различимость сигналов информационной составляющей при сравнении с зашумленными сигналами ($p < 0,05$) критерием Вилкоксона и вычислено отношение сигнал/помеха. На основании полученного результата установлено, что метод обработки АЭ позволяет повысить отношение сигнал/помеха до 4 дБ и улучшить фильтрацию высокочастотной помехи.

При контроле двух инструментов между параметрами АЭ установлена корреляционная взаимосвязь r — от $>0,5$ до $0,7$, определяющая прямую и заметную связь результатов измерений. Данная взаимосвязь может быть обусловлена различием свойств и характеристик источников АЭ при контроле двух инструментов для $p < 0,05$. На основе регрессионного анализа разработана модель, характеризующая различимость между параметрами АЭ при контроле бездефектного и дефектного инструмента, и имеющая статистическую значимость $p = 0,01$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бехер С. А., Бобров А. Л. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии / Под ред. Л. Н. Степанова. Новосибирск: СГУПС, 2013. 145 с.
2. Бехер С. А. Методы контроля динамически нагруженных элементов подвижного состава при ремонте и в эксплуатации на основе комплексного использования тензометрии и акустической эмиссии: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2017. 36 с.
3. Barat V., Borodin Y., Kuzmin A. Intelligent AE signal filtering methods // Journal of Acoustic Emission. 2010. Vol. 28. P. 109—119.
4. 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.
5. Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А. Оценка влияния методов фильтрации на погрешность измерения параметров сигнала акустической эмиссии // Сб. тр. 25-й Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. СПб, 2022. С. 24—27.
6. Филоненко С. Ф. Влияние износа режущего инструмента при контролируемой глубине резания на акустическую эмиссию // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. Т. 6, №. 9. С. 47—50.
7. Прохоров С. А., Хаймович А. И., Столбова А. А., Кондратьев А. И. Моделирование процесса фрезерования по сигналу виброакустической эмиссии с помощью анализирующих вейвлетов Морле // Информационные технологии и нанотехнологии. 2017. Т. 5, №. 2. С. 1303—1309.
8. Altay Y. A., Fedorov A. V., Stepanova K. A. Acoustic emission signal processing based on polynomial filtering method // Proc. of the 2022 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. St. Petersburg, 2022. P. 1320—1326.
9. Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А. Дескриптивный анализ и оценка отношения сигнал/помеха, выработанных при реализации метода полиномиальной фильтрации сигналов акустической эмиссии // Сб. докл. 24-й Междунар. конф. „Цифровая обработка сигналов и ее применение“ DSPA – 2022. Москва, 2022. С. 78—82.
10. Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А., Кузиванов Д. О. Метод помехоустойчивой обработки для повышения точности измерения сигналов акустической эмиссии // Сб. тез. XXXIII Уральской конф. „Физические методы неразрушающего контроля“. Екатеринбург, 2022.
11. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1968. 504 с.

12. Gomez M. P. Assessment of cutting tool condition by acoustic emission // *Procedia Materials Science*. 2012. Vol. 1, N 2. P. 321—328.
13. Салин В. Н., Чурилова Э. Ю. Практикум по курсу „Статистика“. М.: Перспектива, 2002. 188 с.
14. Растегаев И. А., Мерсон Д. Л., Растегаева И. И. Подходы к анализу шумоподобной акустической эмиссии при беспороговом режиме ее регистрации // Сб. матер. Всерос. конф. „Актуальные проблемы метода акустической эмиссии“. Тольятти, 2018. С. 103—104.
15. Попков А. А. Методическое и алгоритмическое обеспечение акустико-эмиссионного контроля при ударном нагружении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2021. 24 с.
16. Алтай Е., Федоров А. В., Степанова К. А. Оценка взаимосвязи информационных составляющих и помех сигналов акустической эмиссии // *Контроль. Диагностика*. 2022. Т. 25, № 6. С. 36—45.
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. P. 23—32.
18. Elforjani M., Shanbr S. Prognosis of bearing acoustic emission signals using supervised machine learning // *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2018. Vol. 65, N 7. P. 5864—5871.

Сведения об авторах

- Ельдос Алтай** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: aeldos@inbox.ru
- Алексей Владимирович Федоров** — д-р техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: avfedorov@itmo.ru
- Ксения Андреевна Степанова** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: ledy.xs93@yandex.ru
- Дмитрий Олегович Кузиванов** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: kuzivanovdmitry@gmail.com

Поступила в редакцию 07.06.2022; одобрена после рецензирования 25.07.2022; принята к публикации 31.08.2022.

REFERENCES

1. Bekher S.A., Bobrov A.L. *Osnovy nerazrushayushchego kontrolya metodom akusticheskoy emissii* (Fundamentals of Non-Destructive Testing by the Method of Acoustic Emission), Novosibirsk, 2013, 145 p.
2. Bekher S.A. *Metody kontrolya dinamicheski nagruzhennykh elementov podvizhnogo sostava pri remonte i v ekspluatatsii na osnove kompleksnogo ispol'zovaniya tenzometrii i akusticheskoy emissii* (Methods for Monitoring Dynamically Loaded Rolling Stock Elements during Repair and Operation Based on the Integrated Use of Strain Gauges and Acoustic Emission), Extended abstract of Doctor's thesis, Tomsk, 2017, 36 p. (in Russ.)
3. Barat V., Borodin C., Kuzmin A. *Journal of Acoustic Emission*, 2010, vol. 28, pp. 109—119.
4. He Y. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, vol. 148, pp. 107146.
5. Altay Y., Fedorov A.V., Stepanova K.A. *Sbornik trudov 25-y Mezhdunarodnoy konferentsii po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* (Proceedings of the 25th International Conference on Soft Computing and Measurement), St. Petersburg, 2022, pp. 24—27.
6. Filonenko S.F. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 2015, no. 9(6), pp. 47—50. (in Russ.)
7. Prokhorov S.A., Khaimovich A.I., Stolbova A.A., Kondratiev A.I. *Information technology and nanotechnology*, 2017, no. 2(5), pp. 1303—1309. (in Russ.)
8. Altay Y.A., Fedorov A.V., Stepanova K.A. *Proc. of the 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, St. Petersburg, 2022, pp. 1320—1326.
9. Altay Y., Fedorov A.V., Stepanova K.A. *24-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya „Tsfirovaya obrabotka signalov i yeye primeneniye“ DSPA-2022* (24th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications. DSPA-2022), Collection of reports, Moscow, 2022, pp. 78—82. (in Russ.)
10. Altay Y., Fedorov A.V., Stepanova K.A., Kuzivanov D.O. *Fizicheskiye metody nerazrushayushchego kontrolya* (Physical Methods of Non-Destructive Testing), Collection of abstracts of the XXXIII Ural conference, Yekaterinburg, 2022. (in Russ.)
11. Levin B.R. *Teoreticheskiye osnovy statisticheskoy radiotekhniki* (Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering), Moscow, 1968, 504 p. (in Russ.)
12. Gomez M.P. *Procedia Materials Science*, 2012, no. 2(1), pp. 321—328.
13. Salin V.N., Churilova E.Yu. *Praktikum po kursu „Statistika“* (Workshop on the Course „Statistics“), Moscow, 2002, 188 p. (in Russ.)
14. Rastegaev I.A., Merson D.L., Rastegaeva I.I. *Aktual'nyye problemy metoda akusticheskoy emissii* (Actual Problems of the Acoustic Emission Method), Collection of materials of the All-Russian Conference, Tolyatti, 2018, pp. 103—104. (in Russ.)
15. Popkov A.A. *Metodicheskoye i algoritmicheskoye obespecheniye akustiko-emissionnogo kontrolya pri udarnom nagruzhении* (Methodical and Algorithmic Support of Acoustic Emission Control under Shock Loading), Extended

abstract of candidate's thesis, Novosibirsk, 2021, 24 p. (in Russ.)

16. Altay Y., Fedorov A.V., Stepanova K.A. *Control. Diagnostics*, 2022, no. 6(25), pp. 36–45. (in Russ.)
17. Zakharov L.A., Martyushev D.A., Ponomareva I.N. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 253, pp. 23–32.
18. Elforjani M., Shanbr S. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2018, no. 7(65), pp. 5864–5871.

Data on authors

- Yeldos Altay** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: aeldos@inbox.ru
- Alexey V. Fedorov** — Dr. Sci., Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: avfedorov@itmo.ru
- Ksenia A. Stepanova** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: ledy.xs93@yandex.ru
- Dmitry O. Kuzivanov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: kuzivanovdmitry@gmail.com

Received 07.06.2022; approved after reviewing 25.07.2022; accepted for publication 31.08.2022.