

<https://doi.org/10.51301/ce.2023.i3.04>

## Associations between predictors of acoustic emission signal processing system: accuracy and noise resistance analysis

Ye. Altay<sup>1\*</sup>, A.V. Fedorov<sup>2</sup>, N.A. Bayanbay<sup>1</sup>, Zh.M. Kerimkulov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>ITMO University, Saint Petersburg, Russia

\*Corresponding author: [aeldos@inbox.ru](mailto:aeldos@inbox.ru)

**Abstract.** In this article presents the results of analysis of the association between the predictors of root-mean square error, signal-to-noise ratio and correlation coefficient, which characterize the functioning methods of digital acoustic emission signals processing. The analysis and evaluation of predictors developed at the output of digital high-pass filters Butterworth, Bessel and Daubechies wavelet are carried out. For first time, a significant association between the predictors of root-mean square error, the signal-to-noise ratio and the correlation coefficient for the Butterworth digital filter with a correlation coefficient  $R > 0.9$ , associated with a simultaneous increase in the noise resistance and processing accuracy of the acoustic emission signal in comparison with the Bessel filters and the Daubechies wavelet, was determined and established. The presence of an association between these predictors is confirmed by the calculation of the correlation coefficient and determination, testing of statistical significance. The identified association of predictors can be considered when developing a classification scheme for filtering methods in terms of accuracy and noise resistance.

**Keywords:** *acoustic emission signal, signal filtering accuracy, noise-resistance, correlation coefficient, signal-to-noise ratio, signal shape, Bessel filter, Daubechies wavelet filter.*

### 1. Введение

На сегодняшний день для компенсации помех сигналов акустической эмиссии (АЭ) методы цифровой фильтрации являются наиболее рекомендуемыми, так как при реализации способов аналоговой фильтрации происходит недостаточное шумоподавление [1,2] и приводит к невозможности корректной интерпретации событий АЭ [3]. При реализации методов цифровой фильтрации сигналов АЭ в основном решаются две основные задачи, связанные с выделением и обнаружением данных сигналов [1,2,4]. Результативность обработки при решении перечисленных задач напрямую зависит от эффективности методов цифровой фильтрации, вырабатывающих максимум отношения показателя сигнал/помеха (СП) и минимум среднеквадратического отклонения (СКО). Перечисленные показатели способны наиболее полно охарактеризовать эффективность применяемых методов по точности и помехоустойчивости, где фильтры рассматриваются как элементы входа и выхода системы обработки информации [5].

Согласно введенной общепринятой терминологии в монографии Б.Р. Левина [6], если рассмотреть особенности вышеперечисленных задач обработки сигнала АЭ, можно выделить следующее. Задача обнаружения информативной составляющей, скрытого в помехах обеспечивается максимумом отношения показателя СП [6,7] даже при существенном искажении формы сигнала [6] и в ряде случаях комплексируется проверкой специальных статистических гипотез о факте различимости характеристик сигнала АЭ от помех [1,8]. Обработка сигнала при

выделении информативной составляющей из наблюдаемой аддитивной смеси сигнала и помех реализуема, когда априори известно информация, что в наблюдаемой смеси имеется информативный сигнал АЭ [4]. При решении данной задачи на выходе методов цифровой фильтрации уменьшается значение расчетного показателя СКО между тестовым (не зашумленным) и отфильтрованным (зашумленным) сигналом [4].

### 2. Материалы и методы

Методы цифровой фильтрации, одновременно вырабатывающие максимум отношения показателя СП и минимум СКО способны обеспечить обработку сигнала при минимальных искажениях формы сигнала [2,4]. Форма сигнала АЭ также может быть охарактеризована коэффициентом корреляции (КК) [9], рассчитываемый между тестовым и отфильтрованным сигналом [4]. Комбинирование КК с показателями СП и СКО позволяет оценить и выявить имеющихся взаимозависимости, то есть значимых ассоциации между перечисленными показателями, отражающих способность методов фильтрации проводить компенсацию помех при минимальных искажениях формы сигнала АЭ. В связи с этим представляет особый интерес анализ ассоциации количественных показателей КК-СП-СКО, которые при комбинированной оценке их взаимосвязи продемонстрируют наиболее корректные (значимые) ассоциации.

Цель исследования состоит в анализе значимых ассоциации между рассчитанными показателями КК-СП-

СКО, выработанных на выходе полиномиального цифрового фильтра верхних частот (ФВЧ) Баттерворта и их сравнение с ФВЧ Бесселя [12] и вейвлет фильтром Добеши [10] при значениях зашумленных сигналов АЭ: -10 дБ, -5дБ, 0 дБ, 5 дБ, 10 дБ. Для достижения цели исследования количественные показатели КК-СП-СКО, полученные на выходе методов цифровой фильтрации были адаптированы из [2,4]. Взаимосвязь показателей КК-СП-СКО оценивалось коэффициентом корреляции, детерминации и значимости, представленные в (таблица 1).

**Таблица 1. Ассоциация показателей системы обработки сигналов АЭ**

Показатели	Методы цифровой обработки сигнала АЭ		
	Баттерворт [11]	Бессель [12]	Вейвлет Добеши [10]
СП-СКО	$r = -0.911$ , $R^2 = 0.829$ , $p = 0.005$	$r = -0.725$ , $R^2 = 0.526$ , $p = 0.165$	$r = -0.998$ , $R^2 = 0.997$ , $p = 1 \cdot 10^{-4}$
СП-КК	$r = 0.945$ , $R^2 = 0.894$ , $p = 0.015$	$r = 0.928$ , $R^2 = 0.862$ , $p = 0.022$	$r = 0.895$ , $R^2 = 0.802$ , $p = 0.039$
СКО-КК	$r = -0.963$ , $R^2 = 0.928$ , $p = 0.008$	$r = 0.699$ , $R^2 = 0.489$ , $p = 0.188$	$r = 0.874$ , $R^2 = 0.764$ , $p = 0.004$

Примечание.  $r$  – коэффициент корреляции,  $R^2$  – коэффициент детерминации,  $p$  – коэффициент значимости

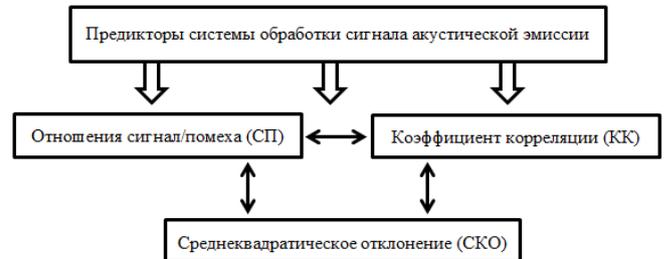
### 3. Результаты и обсуждение

Результаты проведенного анализа показывают, что увеличение показателя СП приводит к убыванию СКО на выходе фильтров Баттерворта [11]  $r = -0.911$ ,  $R^2 = 0.829$  при  $p = 0.005$ ; Бесселя [12]  $r = -0.725$ ,  $R^2 = 0.526$  при  $p = 0.165$ ; вейвлета [10]  $r = -0.998$ ,  $R^2 = 0.997$ ,  $p = 1 \cdot 10^{-4}$ . Однако, несмотря на убывание СКО и наличие тесной связи между СП-СКО для фильтра Бесселя установлена не значимая связь ( $p = 0.165$ ). Это обусловлено тем, что данный метод фильтрации [12], обеспечивая отношения показателя СП до 25 дБ [2,4] при существенном искажении информативной составляющей (до 82% [2]) обнаруживает форму сигнала АЭ, что подтверждается значимой связью показателей СП-КК при  $r = 0.928$ ,  $R^2 = 0.862$ ,  $p = 0.022$ . Взаимосвязь показателей между СКО-КК для фильтра Бесселя также является не значимой  $r = 0.699$ ,  $R^2 = 0.489$ ,  $p = 0.188$ , так как данный фильтр [12] из аддитивной смеси сигнала и помех выделяет информативную составляющую при существенном искажении формы сигнала АЭ [2,4,12].

В сравнении с фильтром Бесселя [12] для фильтра Баттерворта [11] установлена значимая связь показателей СП-КК при  $r = 0.945$ ,  $R^2 = 0.894$ ,  $p = 0.015$  и вейвлет фильтра [10]  $r = 0.895$ ,  $R^2 = 0.802$ ,  $p = 0.039$ . Из значимой связи следует способность разработанного метода в [11] при высоком отношении СП до 71 дБ [2,4] и вейвлет фильтра [10] при низком отношении СП до 8 дБ [2,4] отделить форму сигнала АЭ от помеховой составляющей. Однако, несмотря на данную способность фильтра вейвлета [10] между показателями СКО-КК наблюдается тесная связь при  $r = 0.874$ ,  $R^2 = 0.764$ ,  $p = 0.004$ , что значимо различимо от показателей цифрового ФВЧ Баттерворта  $r = -0.963$ ,  $R^2 = 0.928$ ,  $p = 0.008$ . При этом значение коэффициента корреляции показателей КК-СП-СКО для полиномиального цифрового ФВЧ Баттерворта [2,11] при сравнении с вейвлет фильтром Добеши [10] статистически значимо различимо на  $r > 0.9$  при  $p < 0.05$ , что также подтверждает одновременное улучшение показа-

телей и повышение эффективности системы обработки сигнала АЭ по точности и помехоустойчивости.

Проанализированные выше расчетные показатели имеют общую фундаментальную основу и отражают функционирование методов цифровой фильтрации сигнала АЭ. Эти показатели, предопределяют повышение избирательности системы обработки сигналов АЭ, следовательно, могут сочетаться и усиливать друг друга (рисунок 1).



**Рисунок 1. Взаимозависимость показателей**

Высокая точность и помехоустойчивость метода цифровой фильтрации на основе полиномиального фильтра Баттерворта [11] обеспечивает компенсацию помех при минимальных искажениях формы информативной составляющей на 3% [2]. В работах [13,14] за счет данной особенности метода было установлена различимость бездефектного и дефектного технического состояния инструмента и разработана модель, описывающая взаимосвязь параметров АЭ с техническим состоянием инструмента при акустическом контроле в процессе фрезерной обработки [8,13]. При этом необходимо отметить, что к настоящему времени накопленный экспериментальный материал [14,15] подтверждает положительное влияние полиномиального фильтра Баттерворта на результативность обработки, что также подтверждает полученные результаты рассматриваемой статьи. Новизна данного исследования заключается в том, что при реализации полиномиальных методов цифровой фильтрации впервые выявлено значимые ассоциации расчетных показателей КК-СП-СКО, определяющих максимальное подавление помехи при минимальном искажении формы информативной составляющей АЭ. Ранее оценка данного влияния в существующих работах не получила должной проработанности. Таким образом, полученный выше результат подтверждает существование значимой ассоциации между КК-СП-СКО, характеризующего функционирование метода обработки сигнала АЭ на основе цифрового фильтра Баттерворта при влиянии помех.

### References / Литература

- [1] Barat, V.A. (2019). Razvitie metoda akusticheskoy jemissii za schet avtomatizacii obrabotki dannyh, povysheniya pomehoustojchivosti i dostovernosti obnaruzhenija treshhinopodobnyh defektov metallokonstrukcij (doctoral dissertation). Moskva
- [2] Fedorov, A.V., Altay, Y.A., Stepanova, K.A. & Kuzivanov, D.O. (2022). 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*, (22), 1205-1215. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1205-1215>

- [3] Kuzivanov, D.O., Stepanova, K.A., Fedorov, A.V., Kinzhagulov, I.Yu. & Kovalevich, A.S. (2022). Acoustic emission control of fatigue destruction of thin aluminium alloy structures. *Proceedings of the 2022 International Conference on Information, Control and Communication Technologies, Astrakhan, Russian Federation*. <https://doi.org/10.1109/ICCT56057.2022.9976687>
- [4] Altay, E., Fedorov, A.V., Stepanova, K.A. & Kuzivanov, D.O. (2022). Ocenka jeffektivnosti metodov obrabotki signalov akusticheskoy jemissii pri realizacii polinomial'nyh cifrovyyh fil'trov. *Omskij nauchnyj vestnik*, (3), 128–134. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2022-183-128-134>
- [5] Dranica, Ju.P., Dranica, A.Ju. & Alekseevskaja, O.V. (2010). O svyazi nepreryvnoj i diskretnoj modelej dlja li-nejnyh dinamicheskikh sistem. *Differencial'nye uravne-nija i processy upravlenija*, (3), 20-57
- [6] Levin, B.R. (1968). Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radio-tehniki. M.: Sovetskoe radio
- [7] Faerman, V.A., Avramchuk, V.S. (2014). Obzor metodov povysheniya otnosheniya signal/shum pri reshenii zadachi obnaruzheniya signalov neizvestnoj formy. *Sbornik trudov 20-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii as-pirantov i molodyh uchenyh «Sovremennaja tehnika i teh-nologii», Tomsk: TPU*
- [8] Altay, E., Fedorov, A.V., Stepanova, K.A. & Kuzivanov, D.O. (2022). Eksperimental'noe opredelenie znachimosti statisticheskoy ocenki parametrov, harakterizujushih vtorichnye diagnosticheskie pokazateli akusticheskoy jemissii. *Izvestija vuzov: Priborostroenie*, (10), 735 – 746. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2022-65-10-735-746>
- [9] Barinov, A.V., Fedorov, A.V., Kinzhagulov, I.Ju., Sergeev, D.S. & Dorenskaja, A.V. (2013). Kontrol' kachestva svarnyh soedinenij v processe svarki s primeneniem metoda akusticheskoy jemissii. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki*, (5), 144 – 148
- [10] Kharrat, M., Ramasso, E., Placet, V. & Baubakar, M.L. (2017). A signal processing approach for enhanced acoustic emission data analysis in high activity systems: Application to organic matrix composites. *Mechanical Systems and Signal Processing*, (70), 1038–1055. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.08.028>
- [11] Altay, Y.A., Fedorov, A.V. & Stepanova, K.A. (2022). Acoustic emission signal processing based on polynomial filtering method. *Proceedings of the 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation*. <https://doi.org/10.1109/EIConRus54750.2022.9755729>
- [12] Altay, E., Fedorov, A.V. & Stepanova, K.A. (2022). Ocenka vlijaniya metodov fil'tracii na pogreshnost' izmereniya parametrov signala akusticheskoy jemissii. *Sbornik dokladov 25-i Mezhdunarodnoj konferencii po mjagkim vychisle-nijam i izmerenijam, SPb: SPb GJeTU LJeTI*
- [13] Altay, Y.A., Fedorov, A.V., Stepanova, K.A. & Kuzivanov, D.O. (2022). Acoustic emission signal filtering methods for identifying associations between diagnostic parameters of two milling cutter: experimental data. *Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, Saint Petersburg, Russian Federation*. <https://doi.org/10.1109/EExPolytech56308.2022.9950907>
- [14] Egorov, R.A. (2021). Razrabotka algoritmicheskogo i programmno-tehnicheskogo obespecheniya pervichnoj obrabotki signala pri dinamicheskom indentirovanii (doctoral dissertation). *Sankt-Peterburg*
- [15] Malghan, P.G., Hota, M.K. (2020). A review on ECG signal filtering techniques for rhythm analysis. *Research on Biomedical Engineering*, (36). 171–186. <https://doi.org/10.1007/s42600-020-00057-9>

## Акустикалық эмиссиялық сигналдарды өңдеу жүйесінің болжаушылары арасындағы ассоциациялар: дәлдік және шуға төзімділікті талдау

Е.А. Алтай<sup>1\*</sup>, А.В. Федоров<sup>2</sup>, Н.А. Баянбай<sup>1</sup>, Ж.М. Керимкулов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>ИТМО Университеті, Санкт-Петербург, Ресей

\*Корреспонденция үшін автор: [aeldos@inbox.ru](mailto:aeldos@inbox.ru)

**Аңдатпа.** Бұл мақалада акустикалық эмиссия сигналдарын цифрлық өңдеу әдістерінің жұмысын сипаттайтын орташа квадраттық ауытқу көрсеткіштері, сигнал/кедергі қатынасы және корреляция коэффициенті арасындағы ассоциацияны талдау нәтижелері келтірілген. Баттеруорт, Бессель және вейвлет Добешаның сандық жоғары жиілікті сүзгілерінің шығысында жасалған көрсеткіштерге талдау және бағалау жүргізілді. Butterworth сандық сүзгісі үшін  $R > 0.9$  корреляция коэффициентіндегі орташа квадраттық ауытқу, сигнал/кедергі коэффициенті және корреляция коэффициенті арасындағы маңызды байланыс алғаш рет анықталды және анықталды, бұл Бессель мен Добеши толқыны сүзгілерімен салыстырғанда акустикалық эмиссия сигналын өңдеудің шуылға төзімділігі мен дәлдігін бір уақытта арттырумен байланысты. Осы көрсеткіштер арасындағы байланыстың болуы корреляция мен детерминация коэффициентін есептеу, статистикалық маңыздылығын тексеру арқылы расталады. Анықталған көрсеткіштер қауымдастығы дәлдік пен шуға төзімділік бойынша сүзу әдістерін жіктеу схемасын әзірлеу кезінде ескерілуі мүмкін.

**Негізгі сөздер:** акустикалық эмиссия сигналы, сүзу дәлдігі, шуға төзімді өңдеу, корреляция коэффициенті, сигнал-кедергі қатынасы, сигнал пішіні, Бессель сүзгісі, толқын сүзгісі.

## Ассоциация показателей системы обработки сигналов акустической эмиссии, характеризующих точность и помехоустойчивость

Е.А. Алтай<sup>1\*</sup>, А.В. Федоров<sup>2</sup>, Н.А. Баянбай<sup>1</sup>, Ж.М. Керимкулов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

\*Автор для корреспонденции: [aeldos@inbox.ru](mailto:aeldos@inbox.ru)

**Аннотация.** В данной статье представлены результаты анализа ассоциации между показателями среднеквадратического отклонения, отношения сигнал/помеха и коэффициента корреляции, характеризующих функционирование методов цифровой обработки сигналов акустической эмиссии. Проведен анализ и оценка показателей, выработанных на выходе цифровых фильтров верхних частот Баттерворта, Бесселя и вейвлета Добеши. Впервые определена и установлена значимая ассоциация между показателями среднеквадратического отклонения, отношения сигнал/помеха и коэффициента корреляции для цифрового фильтра Баттерворта при коэффициенте корреляции  $R > 0.9$ , ассоциированная одновременным повышением помехоустойчивости и точности обработки сигнала акустической эмиссии в сравнении с фильтрами Бесселя и вейвлета Добеши. Наличие ассоциации между данными показателями подтверждено вычислением коэффициента корреляции и детерминации, проверки статистической значимости. Выявленная ассоциация показателей может быть учтена при разработке схемы классификации методов фильтрации по точности и помехоустойчивости.

**Ключевые слова:** сигнал акустической эмиссии, точность фильтрации, помехоустойчивая обработка, коэффициент корреляции, отношения сигнал-помеха, форма сигнала, фильтр Бесселя, вейвлет-фильтр.

Received: 03 May 2023

Accepted: 15 September 2023

Available online: 30 September 2023