

Машинное обучение в прогнозировании эффективности методов фильтрации сигнала акустической эмиссии: ассоциация предикторов

Е. А. Алтай
Satbayev University
aeldos@inbox.ru

А. Е. Аязбай
Алматинский университет
энергетики и связи
work_abu@hotmail.com

А. В. Федоров
Университет ИТМО
avfedorov@itmo.ru

Аннотация. В данной статье представлены результаты оценки ассоциации между количественными значениями предикторов системы обработки сигнала акустической эмиссии, полученными на выходе цифровых методов фильтрации, которые были аппроксимированы на основе полиномов Баттерворта и Бесселя второй степени, а также вейвлет функцией Добеши восьмого уровня гладкости. Измеренные значения предикторов системы обработки информации на основе метода машинного обучения – линейной регрессии, были подвергнуты к оценке их ассоциации. Ассоциация между предикторами системы, способными определить, выявить и охарактеризовать на уровне предсказательной аналитики метод, результативно обрабатывающий зашумленные сигналы при фильтрации, также была оценена. Методом регрессионного анализа обнаружена ассоциация между предикторами системы обработки информации, связанная с одновременным улучшением свойств системы по помехоустойчивости и точности обработки сигнала акустической эмиссии для фильтра верхних частот с полиномом Баттерворта в сравнении с фильтрами Бесселя и вейвлета Добеши рассматриваемого порядка. Более того, результативность машинного обучения при оценке связи предикторов на количественном уровне подтверждена вычислением коэффициентов корреляции и детерминации и проверкой статистической значимости.

Ключевые слова: искусственный интеллект; машинное обучение; предикторы системы обработки информации; сигналы акустической эмиссии; регрессионный анализ; точность; помехоустойчивость; фильтры

I. ВВЕДЕНИЕ

В акустико-эмиссионной диагностике для повышения точности измерения сигналов акустической эмиссии (АЭ) важной научно-технической задачей является разработка высокоточных методов фильтрации сигналов АЭ. Данная актуальность обусловлена тем, что высокоточные методы цифровой фильтрации могут противостоять искажающим действиям помех и шумов, вызванных влиянием внешних факторов. К внешним факторам при проведении АЭ контроля и эксплуатации объекта следует отнести помехи, возникающие при работе силовых электрических установок, наводящие электрические импульсы в измерительный тракт, во время сварке, в ходе механообработки и фрезерования объекта контроля, от нагружающего устройства, при кавитации, при истечении жидкости и газа и далее [1–6].

Известно [4, 5], что среди перечисленных помех ослабление именно электрической помехи импульсного происхождения – нетривиальная задача. Это связано с

тем, что данная помеха имеет не только сумму детерминированных компонент, но и вариабельность в значениях амплитуды каждой компоненты. Влияние данной электрической помехи снижает точность измерения информационных составляющих и приводит к невозможности корректной интерпретации данных АЭ событий. Для уменьшения искажений и ослабления влияния помехи на составляющие сигнала АЭ применяют различные методы фильтрации, устойчивые к действиям помех. Однако при разработке методов фильтрации помех сигнала АЭ важно сохранение формы информационной составляющей, несущей информацию о результатах акустического контроля. Таким образом, среди известных методов фильтрации зашумленных измерений актуальность приобретает поиск методов цифровой фильтрации, обеспечивающих наименьшие искажения формы информационной составляющей сигнала АЭ на выходе оцениваемых фильтров.

В работе [7] для повышения точности измерения выполнен анализ методов фильтрации сигнала АЭ, который показал, что широкое применение нашли способы вейвлет-фильтрации, эмпирической модовой декомпозиции, кластерного анализа и пространственно-временной обработки данных на основе алгоритмов искусственного интеллекта. В ходе анализа особое внимание было уделено поиску особенностей методов. Во-первых, простых и высокоточных методов по математической реализации. Во-вторых, особенностям системы обработки информации, например отсутствию необходимости использования схемы фильтрации высоких порядков, влияющих на форму сигнала, выбором математического базиса разложения сигнала и специальных опорных каналов, требующих отдельной формы сигнала помехи для ее фильтрации. В результате анализа методов обработки данных для высокоточной фильтрации, максимального ослабления помех при минимальных искажениях формы сигналов АЭ, установлена применимость методов полиномиальной фильтрации, представляющих собой оптимальный класс фильтров [5].

Минимальное искажение формы сигнала АЭ необходимо и важно для дальнейшей оценки их информативных и диагностических параметров при определении технического состояния объекта контроля [8]. Наличие искажений увеличивает ошибку оценки диагностически значимых параметров сигнала и, как следствие, снижает достоверность результатов контроля.

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

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

В работах [5, 7, 8] выявлено, что реализация цифровых фильтров, аппроксимированных полиномами Баттерворта, является менее проработанной для решения задачи цифровой фильтрации сигналов АЭ. Проведен сравнительный анализ и получены количественные результаты оценки и анализа эффективности методов цифровой фильтрации, а именно полиномиальных фильтров верхних и нижних частот Баттерворта, Бесселя для уменьшения ошибки измерения параметров АЭ и повышения значения показателя соотношения сигнала к помехе. В ходе оценки было установлено, что сочетание методов спектрального анализа и вариативной настройки параметров полиномиальных фильтров позволяют минимизировать показатель сигнала к помехе [5, 14] и снизить ошибку оценки параметров сигнала [8].

В работах [8, 14] показано, что среди методов полиномиальной фильтрации высокую точность обработки сигнала АЭ при минимальных искажениях

информативных составляющих сигнала акустической эмиссии способны обеспечить фильтры с полиномом Баттерворта. При этом среди фильтров Баттерворта высокие значения показателя сигнала к помехе и наименьшее значение ошибки измерения параметров наблюдалось для полиномиального фильтра высоких частот. Это позволило обосновать выбор данного метода для оценки и установления ассоциации между информационными составляющими многоканального сигнала и помехи при разработке модели машинного обучения [5, 7].

Согласно данным многочисленных исследований [1–14], эффективность рассматриваемых методов цифровой фильтрации напрямую зависит от наделяемых свойств фильтров, вырабатывающих количественную оценку отношения показателя сигнала к помехе (СП) и минимум среднеквадратического отклонения (СКО). Несмотря на широту применения именно перечисленных предикторов форма сигнала АЭ также может быть охарактеризована коэффициентом корреляции (КК) [9], рассчитываемый между тестовым и отфильтрованным сигналом [4].

Рассматриваемая статья в отличие от [5, 7, 8, 14, 15, 17], посвящена оценке и поиску ассоциации предикторов для прогнозирования эффективности методов фильтрации. Целью рассматриваемой статьи является количественная оценка ассоциации предикторов на основе метода машинного обучения – линейной регрессии для прогнозирования эффективности методов цифровой фильтрации на основе значений предикторов СП-СКО-КК, рассчитанных на выходе рассматриваемых методов. При этом важно отметить, что среди множества методов искусственного интеллекта выбор линейной регрессии обоснован его высокой работоспособностью и чувствительностью к данным метода контроля [18], а также отсутствием специализированных требований к обучению данных, полученных с объекта контроля.

II. МАТЕРИАЛ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал исследования. Исходным материалом исследований при оценке ассоциации предикторов служат количественные значения, измеренные во время реализации аддитивной модели сигнала акустической эмиссии и помехи при значениях зашумленности: –10 дБ, –5 дБ, 0 дБ, 5 дБ, 10 дБ [14]. Создание такой зашумленности позволяет имитировать некий провокационный помеховый фон для получения развернутой оценки эффективности методов фильтрации сигналов акустической эмиссии для обнаружения ассоциации между оцениваемыми предикторами системы обработки информации.

Метод исследования. Синтез цифровых фильтров с бесконечной импульсной характеристикой, а именно фильтра верхних частот на основе полинома Баттерворта и Бесселя осуществлен в нормированном диапазоне при помощи непрерывных фильтров-аналогов на основе использования билинейного преобразования [5, 14]. Необходимо отметить, что во избежание вносимого искажающего воздействия фильтрами высоких порядков на параметры сигнала АЭ и уменьшения громоздкости вычисления передаточной функции фильтров, были выбраны полиномы второго порядка [5, 7, 8]. Рассчитанные передаточные функции непрерывных фильтров высоких частот и их билинейное преобразование на дискретную представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА I. ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ ФИЛЬТРОВ

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

В рассматриваемой работе в целях обеспечения минимальных искажений информационного сигнала АЭ использовалась двунаправленная фильтрация. Отметим, что в отличие от однонаправленной фильтрации сигнала в виде «вход-выход», под двунаправленной фильтрацией понимается обработка сигнала «в обе стороны». При такой фильтрации сигналы АЭ обрабатываются в прямом направлении, а затем в обратном направлении [7]. Возникающие искажения, вносимые системой фильтрации, взаимно компенсируются. Структурная схема двунаправленной реализации фильтров высокой частоты представлено на рис. 1 [14].

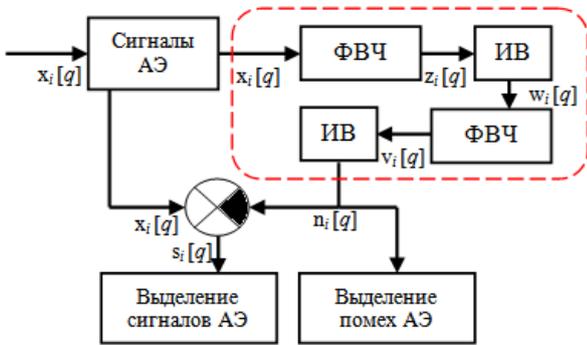


Рис. 1. Структурные схемы двунаправленной обработки сигнала АЭ [14]

Вейвлет-фильтрация сигнала выполнено на основе мягкой пороговой обработки (soft threshold) при выборе материнской вейвлет-функции Добеши 8 порядка гладкости и 8 уровня разложения, аналогично статье [15]. Следует отметить, что вейвлет-функция Добеши выбранного порядка и уровня разложения сигнала в [15] применены исходя из способности данного метода для выделения информационных составляющих сигнала АЭ при низких значениях предиктора СП.

Методы фильтрации зашумленных измерений, одновременно вырабатывающие максимум отношения предиктора СП и минимум СКО способны обеспечить фильтрацию сигнала при минимальных искажениях формы сигнала [2, 4]. Комбинирование предикторов КК с показателями СП и СКО позволяет наиболее полно охарактеризовать и выявить между собой имеющихся взаимозависимости, то есть значимых ассоциации между перечисленными предикторами, отражающих способность цифровых методов проводить дискретную фильтрацию помех при минимальных искажениях формы сигнала АЭ.

Ассоциация предикторов системы обработки оценена методом регрессионного анализа и охарактеризована коэффициентом парной корреляции Пирсона – r , где сила корреляционной связи определена по оценочной шкале Чедокка, как: $r_{0,4-0,7}$ – умеренная связь, $r_{0,7-0,9}$ – высокая связь, $r_{0,9-0,99}$ – весьма высокая связь [16].

Адекватность обнаруженной ассоциации между предикторами оценена коэффициентом детерминации R^2 . Обнаруженная ассоциация предикторов считалась значимой и неслучайной при уровне значимости $p < 0,05$.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном разделе статьи представлены результаты оценки ассоциации между предикторами системы обработки сигнальной информации, характеризующих эффективность методов цифровой фильтрации сигналов АЭ. Результаты обнаруженной ассоциаций между предикторами системы обработки представлены ниже в табл. 2.

ТАБЛИЦА II. АССОЦИАЦИЯ ПРЕДИКТОРОВ

Предикторы	Методы цифровой обработки		
	Баттерворт [5]	Бессель [14]	Вейвлет [15]
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	$r = -0,963$, $R^2 = 0,928$, $p = 0,008$	$r = 0,699$, $R^2 = 0,489$, $p = 0,188$	$r = 0,874$, $R^2 = 0,764$, $p = 0,004$

Результаты проведенного анализа выявили, что увеличение значения предиктора СП приводит к убыванию СКО на выходе фильтров Баттерворта [5] $r = -0,911$, $R^2 = 0,829$ при $p = 0,005$; Бесселя [14] $r = -0,725$, $R^2 = 0,526$ при $p = 0,165$; вейвлета [15] $r = -0,998$, $R^2 = 0,997$, $p = 1 \cdot 10^{-4}$. Однако, несмотря на убывание СКО и наличие 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 % [17]) обнаруживает форму сигнала АЭ, что подтверждается значимой связью показателей СП-КК при $r = 0,928$, $R^2 = 0,862$, $p = 0,022$, соответственно. 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 [8] из аддитивной смеси сигнала и помех выделяет информативную составляющую при существенном искажении формы сигнала АЭ [2, 4, 12].

В сравнении с фильтром Бесселя [14] для фильтра Баттерворта [5] установлена значимая связь показателей СП-КК при $r = 0,945$, $R^2 = 0,894$, $p = 0,015$ и вейвлет фильтра [15] $r = 0,895$, $R^2 = 0,802$, $p = 0,039$. Из значимой связи следует способность разработанного метода в [5] при высоком отношении СП до 71 дБ [14] и вейвлет фильтра [10] при низком отношении СП до 8 дБ [2] отделить форму сигнала АЭ от помеховой составляющей. Однако, несмотря на данную способность фильтра вейвлета [15] 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 цифрового фильтра Баттерворта [5] при сравнении с вейвлет фильтром Добеши [15] значимо различимо на $r > 0,9$ при $p < 0,05$, что показывает одновременное улучшение показателей и

повышение эффективности системы обработки сигнала АЭ по точности и помехоустойчивости.

Высокая точность и помехоустойчивость метода цифровой обработки сигнала акустической эмиссии на основе полиномиального фильтра Баттерворта [5] обеспечивает компенсацию помех при минимальных искажениях формы информативной составляющей на 3% [17]. В работах [17] за счет данной особенности метода была разработана модель обучения, описывающая взаимосвязь параметров АЭ с техническим состоянием инструмента при акустическом контроле в процессе фрезерной обработки. При этом необходимо отметить, что на настоящий момент времени существует накопленный экспериментальный материал и данные [19,20], свидетельствующие о положительном влиянии фильтра Баттерворта на результативность обработки, что лишний раз подтверждает результаты рассматриваемой статьи.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рассматриваемой статье представлены результаты машинного обучения показателей, полученных в ходе обработки сигнала акустической эмиссии, которые способны прогнозировать эффективность методов при изучении ассоциации предикторов. В данной статье результаты машинного обучения представлены только на основе оценки показателей линейной регрессионной модели, а именно на основе корреляции, детерминации и r -значимости регрессионной модели. Оценка данных показателей позволила определить и установить связь между показателями СКО-СП-КК именно для цифрового фильтра, аппроксимированного полиномом Баттерворта, которая составляет $r > 0,9$, что возможно ассоциирована одновременным повышением или улучшением данных показателей на выходе системы обработки информации в сравнении с фильтрами Бесселя и Добеши. Выявленная ассоциация предикторов может быть учтена и применена при разработке новых или совершенствовании уже существующих схематических моделей классификации методов фильтрации по точности и помехоустойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [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. V. 148. P. 107146.
- [2] 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. V. 70. P. 1038-1055.
- [3] Pi K.K., Hwan R.U., Pil C.B. An appropriate thresholding method of wavelet denoising for dropping ambient noise // *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*. 2018. V. 16. P. 1850012.
- [4] Barat V., Borodin Y., Kuzmin A. Intelligent AE signal filtering methods // *Journal of Acoustic Emission*. 2010. V. 28. P. 109-119.
- [5] Altay Y.A., Fedorov A.V., Stepanova K.A. Acoustic emission signal processing based on polynomial filtering method // *Proc. of the 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. Saint Petersburg, Russian Federation, 2022. P. 1320-1326.
- [6] Барат В.А. Развитие метода акустической эмиссии за счет автоматизации обработки данных, повышения помехоустойчивости и достоверности обнаружения трещиноподобных дефектов металлоконструкций: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Москва, 2019. 40 с.
- [7] Алтай Е., Федоров А.В., Степанова К.А. Оценка взаимосвязи информационных составляющих и помех сигналов акустической эмиссии // *Контроль. Диагностика*. 2022. № 6. С. 36-45.
- [8] Алтай Е., Федоров А.В., Степанова К.А. Оценка влияния методов фильтрации на погрешность измерения параметров сигнала акустической эмиссии // *Сб. докладов 25-й Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям*. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. С. 24-27.
- [9] Paarmann L.D. Design and analysis of analog filters: a signal processing perspective. NY: Kluwer academic publishers, 2001. 440 p.
- [10] Somefun O., Akingbade K., Dahunsi F. Uniformly Damped Binomial Filters: Five-percent Maximum Overshoot Optimal Response Design // *Circuits, Systems, and Signal Processing*. 2022. V. 41. P. 3282-3305.
- [11] Быстров С.В., Вундер Н.А., Ушаков А.В. Решение проблемы сигнальной неопределенности при аналитическом конструировании последовательного компенсатора в задаче управления пьезопроводом // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016. № 3. С. 451-459.
- [12] Bystrov S.V., Vunder N.A., Sinetova M.M., Ushakov A.V. Analytical design of consecutive compensator for control systems with delay based on modification of typical polynomial models // *Informatics and Automation*. 2017. V. 52. P. 115-136.
- [13] Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Чернова В.В. Диагностический модуль акустико-эмиссионной системы с автоматической фильтрацией помех // *Датчики и системы*. 2021. № 5. С. 3-14.
- [14] Алтай Е., Федоров А.В., Степанова К.А., Кузиванов Д.О. Оценка эффективности методов обработки сигналов акустической эмиссии при реализации полиномиальных цифровых фильтров // *Омский научный вестник*. 2022. № 3. С. 128-134.
- [15] Kharrat M., Ramasso E, Placet V. Baubakar M.L. A signal processing approach for enhanced Acoustic Emission data analysis in high activity systems: Application to organic matrix composites // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. V. 70. P. 1038-1055.
- [16] Салин В.Н., Чурилова Э.Ю. Практикум по курсу "Статистика". М.: Перспектива, 2022. 188 с.
- [17] Алтай Е. Исследование и разработка методов обработки сигналов акустической эмиссии: Автореф. дис. ... канд. тех. наук // СПб, 2023. 270 с.
- [18] Elforjani M., Shanbr S. Prognosis of bearing acoustic emission signals using supervised machine learning // *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2018. V. 65. P. 5864-5871.
- [19] Егоров Р.А. Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения первичной обработки сигнала при динамическом индентировании: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Санкт-Петербург, 2021. 254 с.
- [20] Altay Y.A., Uskenbayeva R.K., Ayazbay A.A.E., Fedorov, A. V. Machine Learning in Predicting the Impact of Filter Parameters on the Accuracy of Biosignal Measurement // *2025 27th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications*, 2025. P. 1-6.