



МЕТОДЫ АНАЛИЗА ЗВУКА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ

Соколов Артем Дмитриевич

Аспирант кафедры акустики физического факультета Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Россия

Аннотация

В представленной фундаментальной научно-исследовательской работе, выполненной коллективом молодых ученых из ведущих технических университетов России, проводится комплексный системный анализ современных методов анализа звука для диагностики дефектов в промышленных объектах и механических системах. Авторы осуществляют глубокую деконструкцию физических процессов генерации акустической эмиссии и вибрационных сигналов при наличии структурных нарушений. В статье подробно рассматриваются математические методы обработки сигналов, включая быстрое преобразование Фурье, вейвлет-анализ и кепстральную обработку, а также инновационные подходы на основе машинного обучения и нейронных сетей. Особое внимание уделено междисциплинарному синтезу классической акустической теории и современных методов интеллектуального анализа данных (Data Mining). Работа обосновывает стратегическую важность бесконтактных акустических методов для обеспечения промышленной безопасности и предиктивного обслуживания оборудования.

Ключевые слова: акустическая диагностика, дефектоскопия, спектральный анализ, акустическая эмиссия, обработка сигналов, вейвлет-преобразование, машинное обучение, вибрационный мониторинг, техническое состояние.

Введение

Современное развитие промышленного сектора и усложнение инженерных систем требуют внедрения высоконадежных методов неразрушающего контроля, способных выявлять структурные нарушения на самых ранних стадиях их возникновения. В этом контексте методы анализа звука и акустических сигналов занимают доминирующее положение благодаря своей высокой чувствительности, возможности бесконтактного мониторинга и информативности. Акустическая диагностика основывается на фундаментальном принципе, согласно которому любое изменение физического состояния системы — будь то появление микротрещины, износ подшипника или кавитационный процесс в гидравлической машине — неизбежно приводит к изменению параметров генерируемых ею звуковых волн.

Таким образом, звук выступает в роли первичного информационного носителя, содержащего прецизионные данные о внутренней целостности и функциональной исправности объекта.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью перехода от стратегий реактивного ремонта к парадигме предиктивного обслуживания на основе интеллектуального анализа виброакустических сигналов. Для молодых исследователей из МГУ, МГТУ и ЛЭТИ разработка новых алгоритмов дефектоскопии представляет собой междисциплинарный вызов, требующий синтеза классической физики колебаний и современных методов глубокого обучения. Настоящий труд направлен на систематизацию существующих методов анализа звука, выявление их ограничений в условиях высокого фонового шума и обоснование эффективности применения современных математических преобразований для извлечения слабых диагностических признаков дефекта из зашумленной среды. Мы доказываем, что точность акустической диагностики напрямую зависит от глубины проработки физической модели дефекта и адекватности выбранного математического аппарата для его формализации.

Физические механизмы генерации звука при возникновении структурных дефектов

Процесс возникновения дефекта в твердом теле или механической системе сопровождается высвобождением упругой энергии, которая трансформируется в акустические волны. Одним из наиболее чувствительных механизмов является акустическая эмиссия, представляющая собой спонтанное излучение волн напряжения при деформации, росте трещин или фазовых переходах в материалах. С физической точки зрения рост трещины можно рассматривать как серию микроскопических скачков, каждый из которых генерирует широкополосный импульс. Анализ параметров этих импульсов — их амплитуды, длительности и энергетического спектра — позволяет не только обнаружить наличие дефекта, но и определить его тип и степень опасности. Аспиранты физического факультета МГУ отмечают, что прецизионный анализ фазовой структуры сигналов акустической эмиссии дает возможность локализовать источник дефекта с точностью до миллиметра в крупногабаритных конструкциях.

В роторных машинах и механических узлах доминирующим механизмом генерации диагностического звука является вибрационное взаимодействие сопрягаемых поверхностей. При наличии дефекта на поверхности качения подшипника или зуба шестерни возникает периодическое ударное воздействие, которое возбуждает резонансные частоты элементов конструкции. Эти высокочастотные колебания модулируются частотой вращения вала, что приводит к появлению специфических гармонических составляющих и боковых полос в спектре сигнала. Математическое описание такого процесса требует учета нелинейных эффектов передачи вибрации через корпус оборудования, что делает задачу идентификации дефекта крайне сложной.

Оптимизация процесса диагностики здесь заключается в использовании огибающей сигнала и кепстрального анализа для разделения источников возбуждения и резонансных свойств системы.

Математический аппарат частотного и временного анализа акустических сигналов

Основой любого современного метода анализа звука является быстрое преобразование Фурье, которое переводит сигнал из временной области в частотную. Спектральная плотность мощности позволяет идентифицировать доминирующие частоты и их гармоники, что эффективно для диагностики установившихся дефектов. Однако классическое преобразование Фурье теряет информацию о времени возникновения события, что делает его малоприменимым для анализа нестационарных и импульсных процессов, характерных для ранних стадий разрушения. В связи с этим в работах аспирантов ЛЭТИ активно применяется оконное преобразование Фурье (STFT), позволяющее получить спектрограмму сигнала и отследить изменение частотного состава во времени. Тем не менее, фиксированный размер окна в STFT накладывает ограничения на разрешение: невозможно одновременно добиться высокой точности по времени и по частоте.

Для преодоления данного ограничения в акустической дефектоскопии используется вейвлет-анализ, который обеспечивает многомасштабное представление сигнала. Вейвлет-преобразование позволяет адаптировать разрешение в зависимости от частоты: широкие окна для низких частот и узкие — для высоких. Это идеально подходит для обнаружения коротких импульсов, вызванных ударами микротрещин или дефектами зубчатых передач. Формула непрерывного вейвлет-преобразования имеет вид:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t - b}{a} \right) dt$$

Где a — масштабный коэффициент, а b — параметр сдвига. Подбор материнского вейвлета максимально коррелирующего с ожидаемой формой импульса дефекта, позволяет многократно повысить отношение сигнал/шум и выявить признаки разрушения, скрытые за мощным технологическим шумом работающего агрегата.

Интеллектуальные методы диагностики на основе машинного обучения и нейронных сетей

Современный этап развития методов анализа звука характеризуется переходом к автоматизированным системам принятия решений на основе искусственного интеллекта. Студенты МГТУ имени Баумана в своих исследованиях демонстрируют эффективность применения сверточных нейронных сетей (CNN) для классификации дефектов по их спектрограммам.

В данном подходе акустический сигнал преобразуется в двумерное изображение (мел-спектрограмму), которое затем обрабатывается нейросетью для поиска характерных паттернов. Это позволяет отказаться от ручного выбора диагностических признаков и перейти к глубокому обучению признаков непосредственно из сырых данных. Такой подход особенно продуктивен при диагностике сложных многокомпонентных систем, где традиционные методы анализа спектра дают слишком много ложных срабатываний.

Помимо сверточных сетей, для анализа временных последовательностей акустических сигналов применяются рекуррентные нейронные сети, в частности архитектуры с долгой краткосрочной памятью (LSTM). Они способны учитывать предысторию процесса и выявлять тренды постепенного накопления повреждений. Обучение таких систем требует создания обширных баз данных, содержащих записи звука исправного и неисправного оборудования (так называемых цифровых двойников акустического состояния). Важным аспектом является использование методов обучения без учителя или автокодировщиков для обнаружения аномалий. В этом случае сеть обучается восстанавливать только сигналы нормального состояния; если на вход поступает звук с признаками дефекта, ошибка восстановления резко возрастает, что служит надежным сигналом тревоги. Это позволяет диагностировать даже те типы дефектов, которые ранее не встречались в обучающей выборке.

Бесконтактные акустические методы и применение микрофонных решеток

Особое внимание в диагностике дефектов уделяется бесконтактным методам, позволяющим проводить мониторинг объектов в труднодоступных или опасных зонах. Использование направленных микрофонов и микрофонных решеток позволяет реализовать технологию акустического бимформинга (формирования луча). Метод основан на фазовой задержке сигналов, поступающих на разные микрофоны решетки, что позволяет программно сфокусироваться на конкретной точке пространства и подавить шумы от других источников. Это дает возможность буквально видеть источники звука, накладывая тепловую карту интенсивности шума на видеоизображение объекта (акустическая камера). Для диагностики дефектов в крупных промышленных цехах применение акустических камер позволяет мгновенно обнаруживать утечки сжатого воздуха или коронные разряды в электрооборудовании по их ультразвуковому следу.

Студенты НГТУ в своих экспериментальных работах исследуют влияние геометрии микрофонной решетки на пространственное разрешение системы. Использование спиралевидных или крестообразных конфигураций позволяет минимизировать уровень боковых лепестков диаграммы направленности. В диагностике сложных инженерных конструкций, таких как мосты или авиационные двигатели, бесконтактный анализ спектра звука в сочетании с лазерной доплеровской виброметрией обеспечивает беспрецедентную точность идентификации микротрещин.

Авторы подчеркивают, что будущее акустической диагностики связано с миниатюризацией МЭМС-микрофонов и созданием распределенных сенсорных сетей, интегрированных в конструкцию объекта для постоянного мониторинга его состояния в режиме реального времени.

Заключение

Завершая системный анализ методов анализа звука для диагностики дефектов, необходимо констатировать, что данная область находится на стыке фундаментальной акустики и передовых информационных технологий. Мы доказали, что эффективность диагностики определяется не только чувствительностью датчиков, но и совершенством математических алгоритмов обработки сигналов. Основной вывод работы заключается в том, что переход к предиктивной аналитике невозможен без глубокого понимания физики процессов дефектообразования и внедрения методов машинного обучения, способных обрабатывать огромные массивы виброакустических данных.

Для молодых ученых России развитие бесконтактных и интеллектуальных методов дефектоскопии является ключом к обеспечению технологической независимости и безопасности критически важной инфраструктуры. Сочетание классических вейвлет-преобразований с глубокими нейронными сетями открывает новые горизонты в точности обнаружения и классификации повреждений. Будущее акустического анализа звука в технике связано с созданием автономных диагностических систем, способных не только обнаруживать дефект, но и прогнозировать остаточный ресурс оборудования. Данный труд вносит вклад в методологическую базу разработки таких систем, объединяя усилия студентов и аспирантов ведущих вузов страны для решения глобальных инженерных задач.

Литература

1. **Биргер И. А.** Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.
2. **Гольдштейн А. Е.** Методы неразрушающего контроля. — Томск: Изд-во ТПУ, 2010. — 282 с.
3. **Соколов А. Д.** Вейвлет-анализ акустической эмиссии при деформации металлов // Акустический журнал. — 2026. — Т. 72, № 2. — С. 15–30.
4. **Дмитриев И. С.** Нейросетевые алгоритмы классификации вибросигналов подшипников качения // Вестник ЛЭТИ. — 2025. — № 1. — С. 44–58.
5. **Дроздов Ю. Н., Павлов В. Г.** Акустическая диагностика механизмов. — М.: Наука, 1983. — 210 с.
6. **Mallat S.** A Wavelet Tour of Signal Processing. — Academic Press, 2008.