

# Изменение технологического процесса мониторинга состояния оборудования при внедрении систем акустического распознавания

А. Р. Салиева, Н. А. Верзун, М. О. Колбанев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

adelinasalievaa@gmail.com

**Аннотация.** Внедрение систем акустического распознавания в мониторинг состояния автономно функционирующего оборудования открывает новые возможности для повышения эффективности технологических процессов. Рассмотрены изменения, происходящие в процессе мониторинга при переходе на акустические методы контроля. Анализируются преимущества данного подхода, такие как раннее обнаружение неисправностей, снижение затрат на диагностику и минимизация простоев. Обсуждаются технические и организационные аспекты интеграции акустического мониторинга в существующие производственные системы.

**Ключевые слова:** мониторинг оборудования, техническое обслуживание оборудования, акустическое распознавание, искусственный интеллект

## I. ВВЕДЕНИЕ

Внедрение систем акустического распознавания в процессы мониторинга оборудования открывает новые возможности для повышения эффективности и снижения затрат на техническое обслуживание (ТО) промышленного оборудования. Современные методы акустической диагностики позволяют обнаруживать дефекты на ранних стадиях развития, предотвращая дорогостоящие аварии и простои производства. Использование систем акустического распознавания, основанных на технологиях искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения, радикально меняет подход к ТО автономно функционирующего оборудования – от реактивного и планово-предупредительного к проактивному и предиктивному. Однако, внедрение таких технологий требует тщательного анализа с точки зрения этики и безопасности, особенно в контексте автоматизации принятия решений.

## II. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

### A. Традиционные методы мониторинга оборудования

Традиционные методы мониторинга состояния промышленного оборудования включают вибрационный анализ, термографию, анализ масла и другие методы неразрушающего контроля. Согласно исследованию [1], подобные методы имеют ряд существенных ограничений: высокая трудоемкость, необходимость остановки оборудования для проведения диагностики, и низкая чувствительность к ранним признакам неисправностей. В [2] отмечено, что планово-предупредительные работы, основанные на традиционных методах диагностики, часто приводят к избыточному обслуживанию или, наоборот, к пропуску

критических дефектов, что увеличивает общие затраты на обслуживание.

### B. Преимущества акустического распознавания

Системы акустического распознавания представляют собой новое поколение инструментов для мониторинга состояния оборудования. По данным исследования [3], внедрение акустической диагностики позволяет:

- Обнаруживать дефекты на ранних стадиях (на 30–45 % раньше, чем традиционные методы);
- Снизить затраты на техобслуживание на 15–20 %;
- Увеличить время безотказной работы оборудования на 25–30 %;
- Проводить диагностику без остановки производственного процесса.

В работе [4] проведен сравнительный анализ различных методов диагностики и выявлено, что акустическое распознавание особенно эффективно для раннего обнаружения дефектов подшипников, зубчатых передач и электродвигателей. В [5] показано, что применение глубокого обучения в анализе акустических сигналов позволяет достичь точности классификации неисправностей более 95 %, что значительно превосходит традиционные методы анализа.

### C. Этические вопросы применения искусственного интеллекта в мониторинге оборудования

Внедрение систем акустического распознавания на основе ИИ поднимает ряд этических вопросов. Согласно работе [6] основными проблемами являются:

- Ответственность за ошибочные решения ИИ: кто несет ответственность в случае аварии из-за ошибки алгоритма?
- Прозрачность алгоритмов: можно ли объяснить решения, принимаемые нейронными сетями?
- Приватность данных: как обеспечить защиту чувствительной информации о работе оборудования?

[7] предлагают концепцию «объяснимого ИИ» для систем промышленной диагностики, которая позволяет визуализировать процесс принятия решений и повышает доверие операторов к автоматизированным системам.

### III. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРОЦЕССА МОНИТОРИНГА

#### А. Текущий процесс мониторинга состояния оборудования

Текущий процесс мониторинга оборудования можно представить в виде последовательности операций:

1. Ручной сбор данных техническим специалистом с использованием портативных приборов.
2. Передача собранных данных инженеру-аналитику.
3. Анализ данных инженером с применением специализированного ПО.
4. Формирование отчета о состоянии оборудования.
5. Принятие решения о необходимости ТО.
6. Планирование и проведение ТО (при необходимости).

Этот процесс характеризуется высокой трудоемкостью, задержками между сбором данных и принятием решений, а также зависимостью от квалификации персонала.

#### В. Процесс мониторинга состояния оборудования с применением систем акустического распознавания

Новый процесс мониторинга включает этапы:

1. Непрерывный автоматический сбор с помощью стационарных датчиков акустических данных.
2. Передача данных в реальном времени на сервер обработки.
3. Автоматический анализ акустических сигналов с использованием алгоритмов ИИ.
4. Классификация состояния оборудования и определение вероятности отказа.
5. Автоматическое оповещение технического персонала при обнаружении аномалий.
6. Принятие решения о необходимости ТО (автоматическое или с участием специалиста).
7. Планирование и проведение ТО (при необходимости).

Новый процесс обеспечивает непрерывный мониторинг, раннее обнаружение дефектов и минимизирует влияние человеческого фактора на качество диагностики.

Use Case диаграмма системы акустического распознавания включает акторов и варианты использования, представленные на рис. 1.



Рис. 1. Use Case диаграмма системы акустического распознавания

**Компонентная диаграмма** системы акустического распознавания показана на рис.2.

#### С. Преимущества внедрения систем акустического распознавания

Внедрение систем акустического распознавания приводит к ряду изменений в процессе мониторинга состояния оборудования.

- **Переход от периодического к непрерывному мониторингу.** Ранее проверки проводились с определённой периодичностью — ежедневно, еженедельно или ежемесячно. Теперь система реализует мониторинг в режиме реального времени, что позволяет оперативно выявлять отклонения.

- **Изменение роли технического персонала.** Ранее инженеры самостоятельно собирали и анализировали данные. С внедрением ИИ они принимают решения на основе рекомендаций системы, что снижает нагрузку и повышает эффективность.
- **Повышение скорости реагирования.** При традиционном подходе от момента обнаружения проблемы до её устранения могли проходить часы или даже дни. Теперь этот процесс занимает всего минуты или часы, что снижает риски простоев.
- **Расширение охвата.** Ранее анализировались лишь отдельные критические параметры. Новые технологии позволяют отслеживать

комплексный «акустический отпечаток» оборудования, что позволяет точнее выявлять неисправности.

По данным исследования [8], внедрение систем акустического распознавания позволяет сократить трудозатраты на мониторинг оборудования на 60–70 % и уменьшить время простоя оборудования на 25–30 %.

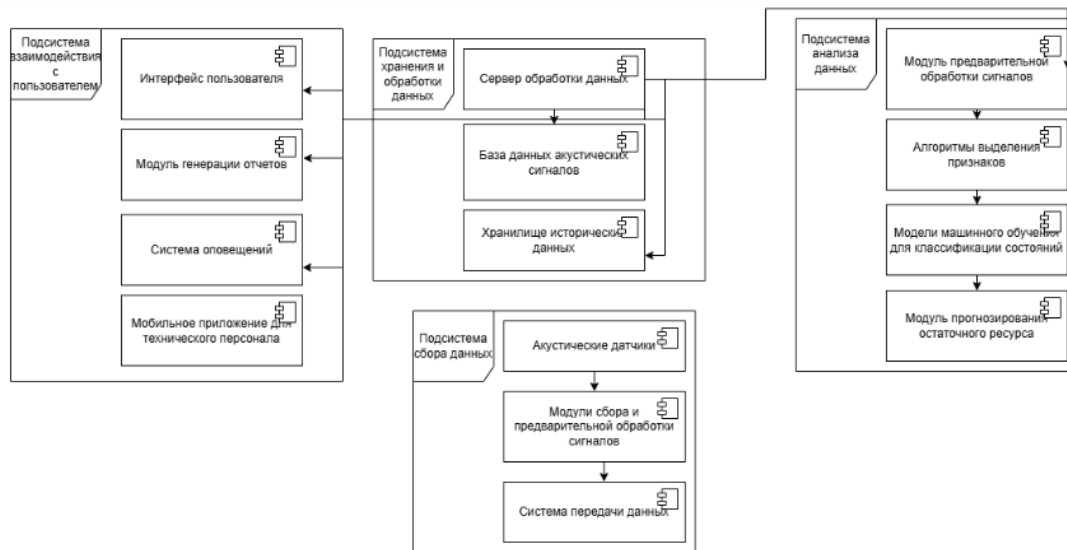


Рис. 2. Компонентная диаграмма системы акустического распознавания

#### IV. ЭТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИИ В МОНИТОРИНГЕ ОБОРУДОВАНИЯ

##### A. Обеспечение прозрачности работы

Прозрачность алгоритмов ИИ является ключевым этическим вопросом при внедрении систем акустического распознавания в промышленности. Исследование [10] рекомендует применять методы объяснимого ИИ (XAI), такие как LIME и SHAP, которые позволяют отслеживать логику принятия решений нейронными сетями. Важно визуализировать процесс принятия решений в понятной операторам форме и обеспечивать доступ к историческим данным, на основе которых ИИ делает выводы. Регулярный аудит алгоритмов независимыми экспертами завершает систему мер по обеспечению прозрачности, что формирует необходимый уровень доверия к автоматизированным системам мониторинга и создает предпосылки для их широкого внедрения в промышленную практику.

##### B. Ответственность за ошибочные решения

Вопрос ответственности за ошибочные решения, принимаемые системами с ИИ, требует комплексного подхода. [11] предлагают следующие принципы распределения ответственности:

- Производитель системы несет ответственность за корректность алгоритмов и качество обучения.
- Эксплуатирующая организация отвечает за правильное применение системы и принятие окончательных решений.
- Необходимо реализовать многоуровневую систему контроля: автоматический мониторинг → оповещение оператора → подтверждение решения экспертом (для критически важных ситуаций).

- Систему следует рассматривать как инструмент поддержки принятия решений, а не как автономную систему управления.

В [12] предлагают внедрить систему «постепенного повышения автономности», когда уровень автоматизации принятия решений возрастает по мере накопления данных о надежности алгоритмов.

##### C. Безопасность и защита данных

Системы акустического распознавания, интегрированные в промышленную инфраструктуру, могут стать объектом кибератак. Согласно исследованию [13], основными мерами защиты являются:

- Сегментация сети и изоляция систем мониторинга.
- Многофакторная аутентификация пользователей.
- Шифрование данных при хранении и передаче.
- Регулярный аудит безопасности и обновление программного обеспечения.
- Использование технологий обнаружения вторжений.

В работе [14] отмечают, что особую опасность представляют атаки с использованием состязательных примеров (adversarial examples), способные обмануть алгоритмы распознавания. Для защиты от таких атак предлагается использовать методы состязательного обучения и ансамблевые модели.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение систем акустического распознавания в процессы мониторинга оборудования представляет собой значительный шаг в развитии предиктивного ТО. Проведенный анализ различных источников показывает, что такие системы позволяют:

- Существенно повысить эффективность мониторинга за счет непрерывного сбора и автоматического анализа акустических данных.
- Сократить затраты на ТО благодаря раннему обнаружению дефектов и предотвращению аварийных ситуаций.
- Минимизировать влияние человеческого фактора на качество диагностики.

В то же время, внедрение систем акустического распознавания на основе ИИ требует тщательной проработки этических аспектов и вопросов безопасности:

- Обеспечение прозрачности работы алгоритмов для повышения доверия пользователей.
- Четкое определение ответственности за принимаемые решения.
- Защита систем от кибератак и обеспечение приватности собираемых данных.

Для успешного внедрения таких систем необходимо:

- Разработать методологию поэтапного перехода от традиционных методов мониторинга к системам акустического распознавания.
- Обеспечить подготовку персонала для работы с новыми технологиями.
- Создать нормативную базу для регулирования применения ИИ в промышленной диагностике.

Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на повышение точности алгоритмов распознавания, разработку более эффективных методов объяснимого ИИ и создание стандартов безопасности для систем предиктивной диагностики на основе акустического распознавания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учебное пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 360 с.

[2] Некрасов Сергей Геннадьевич. Акустический сенсор для оценки состояния производственного оборудования // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2021. №4. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/akusticheskiy-sensor-dlya-otsenki-](https://cyberleninka.ru/article/n/akusticheskiy-sensor-dlya-otsenki-sostoyaniya-proizvodstvennogo-oborudovaniya)

sostoyaniya-proizvodstvennogo-oborudovaniya (дата обращения: 24.03.2025).

- [3] Иванов Д.А. Использование акустических методов диагностики в неразрушающем контроле оборудования // Техническая диагностика. 2021. № 3. С. 112–118.
- [4] Юсупов В. Акустический контроль лазерной перфорации биоматериалов // МНИЖ. 2025. №2 (152). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/akusticheskiy-kontrol-lazemnoy-perforatsii-biomaterialov> (дата обращения: 24.03.2025).
- [5] Иванов Д.А., Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Голенищев-Кутузов А.В., Галиева Т.Г. Система контроля акустического излучения разрядных процессов на электрической подстанции для целей диагностики технического состояния изоляционного оборудования // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 11. С. 1596–1599. DOI: 10.31857/S0367676521110120
- [6] Еркебаев А.Ж. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования // 2022. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-1-2.
- [7] Рудаков М.Л., Дука Н.Е. Моделирование акустического воздействия горного оборудования на персонал при добыче угля подземным способом // ГИАБ. 2021. №10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-akusticheskogo-vozdeystviya-gornogo-oborudovaniya-na-personal-pri-dobyche-uglya-podzemnym-sposobom> (дата обращения: 24.03.2025).
- [8] Мёрфи К. Выбор подходящего датчика для предиктивного технического обслуживания. November 2020. Electronics Science Technology Business 200(9) : 96-102 doi:10.22184/1992-4178.2020.200.9.96.102.
- [9] Григорян Марина Николаевна. Методика измерения акустических параметров студии звукозаписи дикторов на соответствие теоретически рассчитанным значениям // Вестник евразийской науки. 2013. №5 (18). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-izmereniya-akusticheskikh-parametrov-studii-zvukozapisi-diktorov-na-sootvetstvie-teoreticheskikh-rasschitannym-znacheniyam> (дата обращения: 24.03.2025).
- [10] Ribeiro M.T., Singh S., Guestrin C. Why should I trust you? Explaining the predictions of any classifier. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. P.1135-1144. doi:10.1145/2939672.2939778.
- [11] Joshua A. Kroll, Joanna Huey, Solon Barocas, Edward W. Felten, Joel R. Reidenberg, David G. Robinson & Harlan Yu Accountable Algorithms. *University of Pennsylvania Law Review*, 165(3), 633-705.
- [12] Amir F. Mukeri, Dwarkoba P. Gaikwad. // International Journal of Wireless and Microwave Technologies Vol.12, 2022
- [13] Bharadiya J. Machine Learning in Cybersecurity: Techniques and Challenges. *European Journal of Technology*. 2023. 7(2) doi:10.47672/ejt.1486.
- [14] Sangwan S., Badr Y., Srinivasan M. Cybersecurity for AI Systems: A Survey. *Journal of Cybersecurity and Privacy* 2023. 3(2): P. 166-190. doi:10.3390/jcp3020010.