УДК 004.8

ОБЗОР ПОДХОДОВ К ВИБРОДИАГНОСТИКЕ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Воронов Р.Е., аспирант кафедры информационных
и автоматизированных производственных систем,
Научный руководитель – Чичерин И.В., к.т.н., доцент,
Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева
Россия, г. Кемерово

Задача прогнозирования технических отказов оборудования является одной из ключевых в современном производственном цикле, что обусловлено сложностью технологических систем и оборудования, а также ужесточением требований к их надежности и эффективности. Аварийные ситуации не только приводят к значительным финансовым потерям, но и могут повлечь за собой серьезные последствия для безопасности и жизни персонала. Особенно высокий уровень опасности в условиях горнодобывающего производства, где оборудование эксплуатируется в экстремальных условиях. Насосное оборудование занимает ключевую позицию в структуре технологических комплексов горнорудных предприятий, реализуя функции транспортирования технологических жидкостей, дренажа подземных выработок и карьерных пространств. Выход насосного оборудования из строя ведет к каскадным нарушениям всего горнодобывающего процесса, сокращение объемов добычи и созданию критических рисков для безопасности персонала.

Цель исследования – систематизация современных подходов к вибродиагностике насосных установок горнодобывающих предприятий, анализ методов цифровой обработки сигналов и оценка эффективности алгоритмов машинного обучения для задач классификации технических состояний.

Технологии цифровой обработки вибросигналов

Диагностика технического состояния насосных установок, на основе анализа вибрационных характеристик, представляет собой многоэтапный процесс. Данный процесс включает стадии сбора первичных данных, стадию цифровой обработки и последующую интерпретацию результатов. Выделяют следующие методы обработки сигналов:

- Временной анализ;
- Частотный анализ;
- Частотно-временной анализ.

Временной анализ вибрационных сигналов основан на вычислении статистических параметров, характеризующих динамическое состояние насосной установки. К основным временным признакам относятся:

- Среднеквадратическое значение (RMS) - отражающее энергетический уровень вибрации;
- Пик-фактор (Crest Factor) – характеризующий отношение максимальной амплитуды к среднеквадратичному значению;
- Эксцесс (Kurtosis) - чувствительный к импульсивным составляющим вибрации, возникающим при локальных дефектах;
- Асимметрия (Skewness) – отражающая несимметричность распределения амплитуд вибросигнала;
- Импульсный фактор (Impulse Factor) – количественно оценивающий импульсный характер вибрации.

Временные параметры имеют ограниченную диагностическую способность в условиях высокого уровня шума и переменных режимов работы. Повысить диагностическую чувствительность возможно путем формирования трендов временных параметров и применения статистических критериев обнаружения аномалий.

Частотный анализ, основанный на алгоритме быстрого преобразования Фурье, обеспечивает идентификацию частотных компонент, который возможно ассоциировать с различными типами неисправностей насосного оборудования. Метод базируется на преобразовании временного сигнала в частотную область, где дискретные пики мощности коррелируют с параметрами вращающихся элементов. Для центробежных насосных установок ключевыми параметрами выступают следующие параметры:

- Частота вращения ротора ($f_r = \frac{n}{60}$), где n – частота вращения вала в об/мин, формирует базовую гармоническую компоненту;
- Лопаточная частота $f_b = z \cdot f_r$, где z – количество лопастей рабочего колеса. Амплитуда достигает максимальных значений при работе насоса в режимах, отличных от номинальных и может возрастать в 3-5 раз при повреждениях лопастей.

Частотный анализ демонстрирует высокую диагностическую эффективность при анализе режимов функционирования оборудования, обеспечивая четкую локализацию частотных компонент.

Частотно – временной анализ используется для нестационарных вибрационных процессов, характеризующихся временной изменчивостью спектрального состава, реализуется с применением временных и частотных методологий, обеспечивающих одновременную локализацию сигнальных компонентов. Классический анализ Фурье предполагает стационарность исследуемого процесса и представляет частотную информацию, усредненную по всей длительности записи, что приводит к утрате временной локализации события. Частотно – временные методы преодолевают данное ограничение, выделяют следующие методы:

- Кратковременное преобразование Фурье – обеспечивает локализацию частотных компонентов во времени;

- Вейвлет-преобразование – позволяет адаптивно изменять разрешение по времени и частоте;
- Эмпирическая модовая декомпозиция – используется для разложения сигнала на внутренние модовые функции;
- Вариационная модовая декомпозиция - используется для обеспечения устойчивого разложения при наличии шумов.

Применение частотно-временной методологии особенно результативно при диагностике наносных систем, эксплуатируемых в условиях динамического изменения гидравлических нагрузок.

Методы машинного обучения для обработки вибросигналов

Классические методы машинного обучения базируются на принципе экспертного конструирования признакового пространства, требующего знаний о физических процессах генерации вибрационных сигналов и механизмов развития дефектов. Признаковое пространство формируется из статических дескрипторов временной области и частотных характеристик. Можно выделить следующие классические методы машинного обучения, подходящие для решения задачи:

- Метод опорных векторов – демонстрирует высокую результативность при ограниченных объемах данных;
- Алгоритм случайного леса – реализуется на основе множественных деревьев решений, обеспечивая устойчивость к шумам и предотвращает переобучение;
- Метод k-ближайших соседей (k-NN) – ревизует классификацию на основе расстояния в пространстве признаков, проявляя эффективность для много классовых задач идентификации технических состояний.

«Глубокое обучение – это совокупность методов раздела машинного обучения, основанных на обучении представлениям, а не специализированных алгоритмов под конкретные задачи» [1]. Методы глубоко обучения реализуют автоматизированное извлечение признаков непосредственно из исходных вибрационных данных. Модели обучаются на множестве абстрактных уровней, где низкие уровни извлекают простые признаки (края, текстуры спектрограммы), а высокие уровни формируют сложные семантические понятия (типы дефектов). Методы глубоко обучения:

- Сверточные нейронные сети – осуществляют эффективное извлечение паттернов из представлений вибрационных сигналов посредством операций свертки и пулинга;
- Рекуррентные нейронные сети с долгой краткосрочной памятью – специализированы на моделировании долгосрочных временных зависимостей в последовательностях временных данных через механизм управляемых затворов.
- Гибридные архитектуры – синтезируют преимущества обоих подходов. Модули сверточной нейронной сети реализуют извлечение признаков,

тогда как модуль рекуррентной нейронной сети моделирует извлеченные признаки.

Специфика применения в горнодобывающем секторе

Эксплуатационные условия насосных систем в горнодобывающем комплексе формируют специфические требования к диагностическим системам, отличающиеся от промышленных систем общего назначения:

- Агрессивная производственная среда – характеризуется большими температурными перепадами, абразивный износ от перекачиваемой пульпы;
- Интенсивные фоновые вибрационные помехи - работа горнодобывающего оборудования, конвейерные системы, дробильное оборудование, вентиляционное оборудование;
- Динамически изменяющиеся режимы нагрузки – обусловлено циклическим характером добычи и изменением состава пульпы, что вызывает нестационарность вибрационных сигналов и затрудняет выделение признаков;
- Дефицит обучающих данных - критический фактор, определяющий эффективность систем прогнозирования отказов, выступает «качество данных - это совокупность характеристик, определяющие пригодность данных для использования в определенных целях» [2].

Вибродиагностика насосного оборудования горнодобывающей промышленности с применением методов машинного обучения представляет стратегически важное направление повышения эксплуатационной надежности технического оборудования. Проведенный обзор современных подходов к диагностике технического состояния насосных установок демонстрирует переход методологий от классических статистических методов к интеллектуальным системам автоматического извлечения признаков на основе глубокого обучения.

Список литературы:

1. Воронов, Р. Е. Преимущества и недостатки различных подходов к прогнозированию отказов оборудования с помощью технологий искусственного интеллекта / Р. Е. Воронов // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике. – 2025. – Т. 7, № 1. – С. 58-61. – EDN ZBQVIB.

2. Влияние качества данных на точность прогнозирования отказов оборудования с использованием ии // Экономика будущего: тренды, вызовы и возможности: материалы III Всероссийской научно-практической студенческой конференции с международным участием, Казань, 22–23 мая 2025 года. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2025. – С. 726-727. – EDN XLCPYQ.