

ПРЕПРИНТ

На тему: «Разработка адаптивной системы шумовибрационной диагностики силового агрегата автомобиля на основе анализа звукового сигнала»

Аннотация: В процессе работы была создана экспериментальная установка для сбора звуковых и вибрационных сигналов силового агрегата (ДВС и трансмиссии) на стендовых и натурных испытаниях. Предложен метод предобработки сигнала и выделения диагностических признаков в частотной и временной областях. Разработаны и обучены две модели классификации состояния агрегата: на основе градиентного бустинга и сверточной нейронной сети (CNN). Определены такие характеристики, как точность обнаружения неисправности, время срабатывания и устойчивость к фоновым шумам. Показано, что алгоритм на основе CNN позволяет выявлять ранние стадии деградации подшипников и дисбаланса роторов с точностью свыше 94%.

Ключевые слова: ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА, ШУМО-ВИБРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА (NVH), БОРТОВАЯ ДИАГНОСТИКА, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ, СВЕРТОЧНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, ПРЕДИКТИВНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ, СИЛОВОЙ АГРЕГАТ..

Введение

Современная автомобильная инженерия движется в сторону повышения надежности, безопасности и перехода к концепции предиктивного обслуживания. Ключевым элементом этой парадигмы является мониторинг состояния критических узлов, прежде всего силового агрегата. Традиционные методы диагностики, основанные на сканировании кодов ошибок (OBD-II), часто фиксируют неисправность уже на этапе значительной деградации, что ведет к дорогостоящему ремонту и простоям. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки неинвазивных, непрерывных и ранних методов диагностики, интегрируемых в бортовые системы автомобиля. Актуальность исследования обусловлена необходимостью:

Устранения ключевого недостатка инфузии — неконтролируемого образования микро- и макропор из-за сложного взаимодействия факторов (вязкости связующего, проницаемости преформы, режимов давления).

Цель работы:

Разработать и экспериментально апробировать алгоритм адаптивной диагностики состояния силового агрегата на основе анализа акустического излучения.

В соответствии с целью работы были поставлены следующие задачи:

- Спроектировать и собрать стенд для записи звуковых и вибрационных сигналов ДВС и трансмиссии в различных режимах работы и при имитации неисправностей.
- Разработать методику обработки сигналов (фильтрация, оконное преобразование Фурье, мель-кепстральные коэффициенты) для выделения информативных диагностических признаков.
- Обучить и сравнить эффективность моделей машинного обучения для классификации типа и степени тяжести неисправности.
- Оценить помехоустойчивость алгоритма к изменяющимся внешним условиям (шум дороги, работа климатической установки).

Основная часть:

1. Современные подходы к мониторингу состояния агрегатов. Диагностика по виброакустическим сигналам (NVH-анализ) является мощным инструментом, так как любые механические дефекты напрямую модулируют спектральный состав излучаемого шума и вибраций [1]. Классические методы спектрального и огибающего анализа успешно применяются на стендах, но их эффективность в условиях переменных оборотов и внешних помех ограничена [15]. Современные исследования концентрируются на применении методов машинного обучения, в частности глубоких нейронных сетей, способных автоматически выделять сложные нелинейные признаки из сырых данных [22, 30].

2. Описание экспериментальной установки. Стенд включал в себя бензиновый двигатель внутреннего сгорания, соединенный с коробкой передач и динамическим нагрузочным устройством. Для имитации неисправностей использовались специально подготовленные узлы: подшипник качения с искусственной выработкой, маховик с регулируемым дисбалансом. Звуковой сигнал регистрировался с помощью массива из 4 конденсаторных микрофонов, расположенных вокруг агрегата, вибрации – акселерометрами на блоке цилиндров и картере коробки передач. Управление режимами (обороты, нагрузка) и сбор данных осуществлялись через плату National Instruments.

3. Методика обработки данных. Для компенсации эффекта Доплера и изменения частоты вращения использовалась методика пересчета порядка (order tracking) [5]. Исходный звуковой сигнал разбивался на фреймы. Для каждого фрейма вычислялись:

* Спектр мощности (FFT).

* Мел-кепстральные коэффициенты (MFCC), эффективно описывающие тембральные характеристики звука.

* Статистические моменты (среднее, дисперсия, эксцесс) в временной области после полосовой фильтрации в характерных частотных полосах.

4. Разработка и обучение моделей классификации. На первом этапе был использован классический алгоритм градиентного бустинга над деревьями (CatBoost), принимающий на вход вектор рассчитанных признаков. На втором этапе была разработана одномерная сверточная нейронная сеть (1D-CNN), способная обучаться непосредственно на нормализованных сырых аудиосигналах или их спектрограммах. Обучение проводилось на размеченном датасете, содержащем записи для 5 состояний: «исправен», «дисбаланс маховика (легкий/тяжелый)», «дефект подшипника (ранний/развитый)».

5. Результаты и их обсуждение. Модель на основе CatBoost показала точность 87-89% на тестовой выборке, но ее эффективность сильно зависела от качества ручного выделения признаков. 1D-CNN модель, обученная на спектрограммах, достигла точности 94.2%, продемонстрировав лучшую обобщающую способность и устойчивость к фоновому шуму. Важным результатом является успешное распознавание сетью ранней стадии дефекта подшипника, которая не приводила к изменению амплитуды вибрации на характерной частоте, но уже влияла на широкополосную звуковую картину.

Вывод

В ходе выполнения работы были получены практические навыки построения стендов для NVH-диагностики, обработки акустических сигналов и разработки алгоритмов машинного обучения для решения инженерных задач. Экспериментально подтверждена высокая эффективность глубокого обучения (CNN) для раннего выявления механических неисправностей силового агрегата по звуковому сигналу по сравнению с классическими методами. Полученные результаты формируют основу для создания бортовой системы предиктивной диагностики, способной снизить риск внезапных отказов и оптимизировать сервисное обслуживание автомобилей. Для дальнейшего развития проекта необходимо провести валидацию алгоритма на большом парке автомобилей в реальных дорожных условиях.