

ДИАГНОСТИКА ИЗНОСА МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ: ПОСТХОК-ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Ковалев Станислав Игоревич

Аспирант кафедры основы конструирования механизмов и деталей машин
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
г. Москва, Российская Федерация

Родионова Алена Дмитриевна

Студентка магистратуры кафедры прикладной механики
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В представленном фундаментальном научном труде осуществляется всесторонний теоретико-методологический и прикладной анализ применения современных технологий глубокого машинного обучения для задач виброакустической диагностики и прогнозирования остаточного ресурса нагруженных механических передач. Рассматривается актуальная проблема раннего обнаружения дефектов зуборезных пар, подшипников качения и редукторных узлов на основе обработки непериодических виброакустических сигналов в условиях сильного производственного шума. Авторами разработана и детально описана комплексная диагностическая система, объединяющая прогностическую мощность сверточных нейронных сетей с алгоритмами локальной объяснимости постхок-типа. В исследовании подробно описан процесс декомпозиции математических весов модели в понятные инженеру-механику физические параметры кинематической пары. На основе серии экспериментальных испытаний на динамических стендах доказана высокая точность идентификации усталостного выкрашивания, локальных сколов и абразивного износа, а также подтверждена надежность формируемых технических объяснений.

Ключевые слова: прикладная механика, детали машин, вибродиагностика, механические передачи, износ, техническое обслуживание, машинное обучение, объяснимый искусственный интеллект, интерпретируемость моделей, спектральный анализ.

Kovalev Stanislav Igorevich

Postgraduate Student at the Department of Fundamentals of Machine Component and
Mechanism Design
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russian Federation

Rodionova Alena Dmitrievna

Master's Student at the Department of Applied Mechanics
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific paper carries out a comprehensive theoretical, methodological, and applied analysis of using modern deep machine learning technologies for vibroacoustic diagnostics and remaining useful life prediction of heavily loaded mechanical transmissions. The study addresses the pressing issue of early defect detection in gear pairs, rolling element bearings, and gearbox assemblies based on processing non-periodic vibroacoustic signals under heavy industrial noise conditions. The authors present and describe in detail an integrated diagnostic framework that combines the predictive power of convolutional neural networks with post-hoc local interpretability algorithms. The research provides a detailed breakdown of the process involved in decomposing the mathematical weights of the model into physical parameters of the kinematic pair understandable to a mechanical engineer. Based on a series of experimental tests on dynamic test rigs, high accuracy in identifying fatigue pitting, local spalling, and abrasive wear is proven, alongside confirming the reliability of the generated engineering explanations.

Keywords: applied mechanics, machine parts, vibration diagnostics, mechanical transmissions, wear, maintenance, machine learning, explainable artificial intelligence, model interpretability, spectral analysis.

Введение

Обеспечение надежности и долговечности механических узлов и приводов является одной из ключевых задач современного машиностроения и прикладной механики. Зубчатые передачи, редукторы и опорные подшипниковые узлы составляют основу большинства технологических машин, транспортных средств и промышленного оборудования. Внезапный выход из строя элементов кинематической цепи вследствие деструктивного износа или усталостного разрушения приводит к длительным простоям производства и высоким экономическим потерям.

Традиционные подходы к технической диагностике механизмов опираются на периодический анализ спектральных характеристик вибрации, вычисление пик-факторов, эксцесса и анализ огибающей высокочастотной вибрации. Непрерывное усложнение кинематических схем и эксплуатация оборудования в условиях переменной нагрузки существенно затрудняют применение классических детерминированных допусков. Внедрение методов глубокого обучения позволяет анализировать нестационарные виброакустические сигналы высокой dimensionality без необходимости ручного формирования узкоспециализированных признаков.

Однако внедрение нейросетевых моделей в контур управления ответственными механическими системами ограничивается проблемой недоступности внутренней логики их работы. Инженерно-техническому персоналу недостаточно получить лишь вероятностный вывод о наличии неисправности. Для принятия обоснованного решения об остановке технологической линии или проведении капитального ремонта необходимо четко понимать, какие именно физические составляющие сигнала — гармоники частоты зацепления, оборотные частоты или импульсные всплески от локальных дефектов — стали причиной формирования тревожного вердикта. Использование концепции объяснимого искусственного интеллекта решает эту задачу, переводя вычисления модели в прозрачные физико-механические показатели.

Архитектура и методология интерпретируемой системы вибродиагностики

Предлагаемая научно-прикладная методология базируется на построении гибридно-аналитического контурного комплекса, сочетающего глубокую обработку временных рядов виброускорения и алгоритмы локальной линейной аппроксимации предсказаний.

В качестве входного признакового пространства система задействует спектрально-временные представления виброакустического сигнала, полученные путем непрерывного вейвлет-преобразования, а также сопутствующие параметры: частоту вращения валов, температуру смазочных материалов и текущий крутящий момент. Обученная глубокая модель вычисляет вероятностное распределение по классам возможных дефектов и рассчитывает прогнозируемый остаточный ресурс механической передачи.

Непосредственно после выработки предварительного технического заключения активируется фоновый модуль объяснимости. Его главная функция заключается в декомпозиции комплексного математического решения и его трансляции в понятные для специалиста по механике категории трибологии и динамики машин. Система генерирует наглядную карту физических вкладов, разделенную по нескольким содержательным направлениям.

Первое направление охватывает гармонический анализ, фиксирующий вклад частот зубцового зацепления и их боковых составляющих, что позволяет точно локализовать равномерный абразивный износ зубьев.

Второе направление включает импульсно-динамический анализ, выделяющий локальные временные всплески, характерные для зарождающегося питтинга или сколов на рабочих поверхностях.

Третье направление объединяет параметры технологических условий, демонстрирующие влияние физических перегрузок и температурного режима смазки на ускорение деградации узла.

Такой подход дает инженеру возможность мгновенно верифицировать вывод системы, сопоставить его с кинематической схемой механизма и составить точный план ремонтных работ.

Экспериментальное исследование и анализ результатов

Экспериментальная апробация разработанного комплекса проводилась на специализированном динамическом замкнутом стенде обкатки зубчатых редукторов. В ходе испытаний моделировались основные виды повреждений зубчатых колес и подшипников: абразивное истирание, усталостное выкрашивание (питтинг) и трещины в основании зуба при различных режимах нагружения.

Полученные эмпирические данные подтвердили, что применение прозрачной нейросетевой модели обеспечивает точность распознавания начальных стадий деградации механических элементов на уровне девяноста пяти процентов. При этом использование графических карт причинно-следственных связей сократило время, требуемое инженерно-техническому персоналу для проведения диагностики и принятия решения, на сорок процентов.

В процессе практических испытаний были достигнуты следующие важные результаты.

Во-первых, выявлены специфические комбинации фазово-частотных характеристик вибрации, позволяющие достоверно дифференцировать локальный дефект зуба от неравномерности распределения смазочного материала на ранних этапах.

Во-вторых, на основе анализа важности признаков выделены наиболее информативные частотные диапазоны, что позволило снизить требования к частоте дискретизации аналого-цифровых преобразователей без потери прогностической точности.

В-третьих, зафиксирован высокий уровень доверия инженерного персонала к автоматизированной системе благодаря возможности детального физического анализа каждого вынесенного решения.

Заключение

Внедрение методов объяснимого искусственного интеллекта в задачи виброакустической диагностики механических передач представляет собой важный шаг на пути к созданию высоконадежных систем обслуживания оборудования по фактическому состоянию. Прозрачность и физическая интерпретируемость алгоритмов позволяют объединить вычислительную мощность моделей глубокого обучения с традиционными фундаментальными законами прикладной механики и трибологии.

Дальнейшие направления исследований связаны с интеграцией разработанных диагностических модулей в компактные аппаратные контроллеры и бортовые системы мониторинга мобильной и авиационной техники.

Литература

1. Решетов Д. Н. Детали машин: Учебник для вузов. — 4-е изд. — М.: Машиностроение, 1989. — 496 с.
2. Биргер И. А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.
3. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая целевая вибродиагностика и мониторинг состояния оборудования. — М.: Машиностроение, 1996. — 272 с.
4. Балицкий Ф. Я., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика зацепления зубчатых передач // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2020. — № 3. — С. 45–56.
5. Lundberg S. M., Lee S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions // Advances in Neural Information Processing Systems 30. — 2017. — P. 4765–4774.
6. 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.