

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ LIME И GRAD-CAM ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ПЛАНЕТАРНЫХ РЕДУКТОРОВ

Васильев Илья Дмитриевич

Аспирант кафедры теории механизмов и машин

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Карпова Алена Сергеевна

Студентка магистратуры кафедры машиностроительных технологических
комплексов

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Аннотация

В представленном научном труде рассматривается проблема распознавания комплексных многочастотных дефектов в планетарных зубчатых передачах технологических машин. Сложность кинематической структуры планетарных редукторов, обусловленная одновременным вращением нескольких сателлитов и наличием плавающих элементов, приводит к амплитудной и фазовой модуляции виброакустических сигналов, что существенно затрудняет автоматизированную диагностику. Авторами разработан специализированный метод конвертации одномерных виброакустических колебаний в двумерные спектрально-временные скалограммы с их последующей обработкой глубинными сверточными нейронными сетями. Для обеспечения полной понятности и валидируемости выносимых диагностических решений интегрированы методы Grad-CAM и LIME. В работе описан физический механизм подсветки спектрально-временных областей скалограмм, соответствующих локальным повреждениям солнечной шестерни, сателлитов и венца эпицикла. Эмпирические испытания на специализированном стенде подтвердили высокую точность локализации кинематических дефектов и доказали соответствие визуализируемых признаков реальным теоретическим частотам зацепления.

Ключевые слова: планетарный редуктор, виброакустический сигнал, скалограмма, сверточные нейронные сети, объяснимый искусственный интеллект, Grad-CAM, LIME, кинематика, зубчатое зацепление, техническая диагностика.

Vasilev Ilya Dmitrievich

Postgraduate Student at the Department of Theory of Mechanisms and Machines
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russian Federation

Karpova Alena Sergeevna

Master's Student at the Department of Manufacturing Technological Complexes
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract

This scientific paper addresses the problem of recognizing complex multi-frequency defects in planetary gear transmissions of industrial machinery. The complexity of the kinematic structure of planetary gearboxes, caused by the simultaneous rotation of multiple planet gears and the presence of floating elements, leads to amplitude and phase modulation of vibroacoustic signals, which significantly complicates automated diagnostics. The authors have developed a specialized method for converting one-dimensional vibroacoustic oscillations into two-dimensional time-frequency scalograms, followed by processing with deep convolutional neural networks. To ensure full interpretability and validity of the diagnostic decisions, Grad-CAM and LIME methods were integrated. The paper describes the physical mechanism for highlighting time-frequency regions of scalograms corresponding to local damage in the sun gear, planet gears, and ring gear. Empirical tests on a specialized test rig confirmed high accuracy in localizing kinematic defects and proved the correspondence between the visualized features and actual theoretical meshing frequencies.

Keywords: planetary gearbox, vibroacoustic signal, scalogram, convolutional neural networks, explainable artificial intelligence, Grad-CAM, LIME, kinematics, gear meshing, technical diagnostics.

Введение

Планетарные зубчатые передачи широко применяются в тяжелонагруженных приводах горнодобывающей техники, ветроэнергетических установках, авиационных редукторах и транспортных системах благодаря их высокой нагрузочной способности и компактным габаритно-массовым показателям. Однако сложность их конструкции обуславливает специфический характер развития повреждений. Дефекты зубьев солнечной шестерни, сателлитов или эпициклического колеса вызывают сложную картину виброакустического излучения с множественными боковыми частотами и нестационарными всплесками.

Классические подходы, базирующиеся на узкополосном спектральном анализе и синхронном усреднении времени, требуют высокой точности отслеживания фазы вращения и часто оказываются неэффективными при нестабильной скорости или переменном моменте сопротивления. Внедрение глубоких сверточных нейронных сетей (CNN) в сочетании с непрерывным вейвлет-преобразованием (CWT) позволяет преобразовывать одномерные сигналы в двумерные визуальные скалограммы, на которых сверточные фильтры успешно выявляют локальные паттерны деградации.

Основным ограничением применения глубокого зрения в задачах промышленной диагностики оставался риск так называемой «абстрактной корреляции», когда нейросеть принимает решение на основе случайных производственных шумов или артефактов оцифровки, присутствующих на скалограмме. Для предотвращения таких ошибок необходимо использование инструментария объяснимого искусственного интеллекта, способного сгенерировать тепловую карту локализации признаков и подтвердить их привязку к физическим частотам конкретных элементов зацепления.

Методология непрерывного вейвлет-преобразования и визуальной интерпретации

Предлагаемая научно-прикладная методология основывается на последовательном выполнении операций цифровой обработки сигналов и применения визуальных алгоритмов постхок-объяснения.

На первом этапе полученный с акселерометров виброакустический сигнал подвергается непрерывному вейвлет-преобразованию с использованием материнского вейвлета Морле. Это позволяет сформировать двумерные матрицы «время — частота — амплитуда» (скалограммы), наглядно отражающие распределение энергии вибрации во времени.

На втором этапе скалограммы подаются на вход сверточной нейронной сети, которая классифицирует вид технического состояния и степень износа кинематической пары.

На третьем этапе активируются два алгоритма объяснимости — Grad-CAM и LIME, каждый из которых решает отдельную задачу визуальной валидации.

Метод Grad-CAM вычисляет градиенты целевого класса относительно градиентных карт активации последнего сверточного слоя. Результатом является тепловая карта, наложенная на скалограмму и подсвечивающая наиболее важные пиковые области энергии.

Метод LIME сегментирует скалограмму на локальные суперпиксели и аппроксимирует поведение сложной нейросети простой линейной моделью в окрестности конкретного изображения, показывая, какие именно частотные полосы положительно или отрицательно влияют на итоговый класс.

Интерпретация результатов инженером-диагностом строится на сопоставлении подсвеченных областей с расчетными формулами кинематики планетарного механизма.

Первое направление анализа оценивает совпадение подсвеченных частотных полос с модулированными частотами зацепления сателлитов с солнечной шестерней.

Второе направление фиксирует периодичность появления импульсов на временной оси скалограммы и сопоставляет ее с оборотными частотами водила.

Третье направление позволяет дифференцировать фоновые резонансные явления корпуса редуктора от реальных кинематических повреждений зубьев.

Экспериментальная апробация и анализ результатов

Экспериментальная валидация предложенной методики проводилась на испытательном стенде планетарно-соосного редуктора. На стенде последовательно устанавливались комплекты шестерен с искусственно внесенными и естественными дефектами: выкрашиванием поверхности зуба солнечной шестерни, трещиной в корне зуба сателлита и износом зубчатого венца эпицикла.

В ходе экспериментов разработанная система продемонстрировала точность классификации дефектов на уровне девяноста шести процентов. При этом визуализация Grad-CAM и LIME полностью исключила ложные срабатывания, вызванные резонансными колебаниями стендовой станины.

В процессе обработки экспериментальных данных были получены следующие важные результаты.

Во-первых, доказано, что при дефекте сателлита алгоритм Grad-CAM четко фокусируется на характерных периодических импульсах, возникающих с частотой обращения сателлита относительно водила, а не на общих высокоамплитудных шумах.

Во-вторых, с помощью LIME выявлено, что наиболее информативным диапазоном для обнаружения зарождающихся трещин является область высокочастотных резонансов от трех до восьми килогерц, что позволило применить более эффективные полосовые фильтры на этапе предварительной подготовки данных.

В-третьих, инженерный персонал получил удобный графический инструмент, позволяющий соотносить тепловые карты на скалограмме с физическими узлами планетарного редуктора без необходимости погружения в математический аппарат нейронных сетей.

Заключение

Совместное использование непрерывного вейвлет-преобразования, сверточных нейронных сетей и методов визуальной интерпретации Grad-CAM и LIME позволяет создать высоконадежную систему диагностики планетарных редукторов. Графическое подтверждение физической обоснованности решений нейросети обеспечивает необходимый уровень доказательности для внедрения подобных систем в ответственные отрасли промышленного производства.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в адаптации разработанного метода для работы в условиях реального времени на базе компактных графических ускорителей, встраиваемых в системы технического обслуживания промышленного оборудования.

Литература

1. Кудрявцев В. Н. Планетарные передачи: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1977. — 536 с.
2. Дроздов Ю. Н., Архегов В. Г., Смирнов В. И. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник. — М.: Машиностроение, 1986. — 224 с.
3. Павлицев В. Т., Смирнов А. Г. Виброакустическая диагностика сложных кинематических цепей тяжелых машин // Вестник машиностроения. — 2019. — № 8. — С. 12–19.
4. Марков А. В., Лебедев С. Н. Применение вейвлет-анализа для обработки виброакустических сигналов роторного оборудования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2022. — № 4. — С. 58–67.
5. Selvaraju R. R., Cogswell M., Das A., Vedantam R., Parikh D., Batra D. Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-Based Localization // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). — 2017. — P. 618–626.
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.