

## **ДИАГНОСТИКА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН: ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ПО ВЕЙВЛЕТ-СПЕКТРОГРАММАМ**

**Назаров Евгений Михайлович**

Аспирант кафедры технологии машиностроения

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
г. Пермь, Российская Федерация

**Алексеева Дарья Владимировна**

Студентка магистратуры кафедры инновационных технологий машиностроения

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
г. Пермь, Российская Федерация

### **Аннотация**

В представленном исследовании предложена методология автоматизированного обнаружения и классификации повреждений зубчатых зацеплений технологического оборудования на основе глубокого анализа виброакустических сигналов. Для преодоления неполноты информации при нестационарных режимах работы предложено преобразование временных рядов виброускорения в двухмерные вейвлет-спектрограммы с их последующей обработкой обученной сверточной нейронной сетью. С целью обеспечения прозрачности формируемых диагностических решений реализован алгоритм слоя градиентной активации Grad-CAM, позволяющий локализовать информативные частотно-временные области на спектрограммах. На основе серии экспериментов на тестовых обкаточных стендах подтверждена высокая точность идентификации усталостного выкрашивания и сколов зубьев, а также продемонстрирована соответствие подсвечиваемых нейросетью областей теоретическим гармоникам зубцового зацепления.

**Ключевые слова:** зубчатые передачи, вибродиагностика, вейвлет-преобразование, спектрограмма, сверточные нейронные сети, Grad-CAM, интерпретируемость моделей, детали машин, надежность оборудования.

**Nazarov Evgeniy Mikhailovich**

Postgraduate Student at the Department of Mechanical Engineering Technology  
Perm National Research Polytechnic University  
Perm, Russian Federation

**Alekseeva Daria Vladimirovna**

Master's Student at the Department of Innovative Mechanical Engineering  
Technologies  
Perm National Research Polytechnic University  
Perm, Russian Federation

## **Abstract**

This study proposes a methodology for automated detection and classification of gear meshing damage in industrial equipment based on deep analysis of vibroacoustic signals. To overcome information incompleteness during non-stationary operating modes, it is proposed to transform vibration acceleration time series into two-dimensional wavelet spectrograms followed by processing with a trained convolutional neural network. To ensure the transparency of the generated diagnostic decisions, a Grad-CAM gradient activation layer algorithm is implemented, allowing localization of informative time-frequency regions on the spectrograms. Based on a series of experiments on test rigs, high accuracy in identifying fatigue pitting and tooth spalling is confirmed, and the correspondence between the regions highlighted by the neural network and the theoretical tooth meshing harmonics is demonstrated.

**Keywords:** gearings, vibration diagnostics, wavelet transform, spectrogram, convolutional neural networks, Grad-CAM, model interpretability, machine parts, equipment reliability.

## **Введение**

Зубчатые передачи являются наиболее распространенными элементами механических приводов металлорежущих станков, прокатных станов и горно-шахтного оборудования. Высокие динамические нагрузки, возникающие при передаче крутящего момента, приводят к постепенному накоплению усталостных повреждений на рабочих поверхностях зубьев. Своевременная диагностика начальных стадий деградации зацепления позволяет предотвратить внезапный выход узла из строя и оптимизировать графики планового ремонта.

Современные методы виброакустического контроля широко используют спектрально-временные преобразования, позволяющие фиксировать локальные изменения структуры сигнала, вызванные прохождением дефектного зуба через зону контакта. Применение методов глубокого обучения для анализа полученных спектрограмм показало высокую эффективность за счет способности нейросетей извлекать сложные пространственные паттерны без предварительной ручной фильтрации данных.

При этом ключевой проблемой применения сверточных сетей в промышленности остается непредсказуемость их «внутренней логики». Для сервисного инженера или механика цеха категорически недостаточно абстрактной вероятностной оценки наличия дефекта. Требуется наглядная физическая привязка вывода к конкретным кинематическим параметрам передачи. Использование алгоритмов визуальной интерпретации, таких как Grad-CAM, позволяет сформировать «тепловую карту» внимания нейросети и соотнести подсвеченные зоны с расчетными частотами зацепления и их боковыми гармониками.

### **Методика преобразования сигналов и структура визуальной интерпретации**

Разработанная диагностическая схема базируется на непрерывном непрерывном вейвлет-преобразовании (CWT) входного виброакустического сигнала, фиксируемого одноосевым датчиком ускорения на корпусе редуктора.

Сформированные двумерные матрицы «время—частота» подаются на вход сверточной нейронной сети, структура которой оптимизирована для выделения высокочастотных всплесков энергии. После прохождения прямого сигнала и вычисления целевого класса активируется модуль Grad-CAM, вычисляющий градиенты ошибки относительно карт активации последнего сверточного слоя.

Полученная карта накладывается на исходную вейвлет-спектрограмму, что дает возможность провести смысловую декомпозицию результата по нескольким ключевым составляющим.

Первая составляющая оценивает совпадение подсвеченных областей с зубцовой частотой зацепления и ее высшими гармониками, что указывает на прогрессирующий равномерный износ.

Вторая составляющая фиксирует локальные по времени узкополосные всплески, соответствующие импульсам от взаимодействия единичного скола или трещины.

Третья составляющая идентифицирует влияние боковых модулирующих частот, вызванных эксцентриситетом вала или неравномерностью распределения нагрузки по ширине венца.

### **Анализ экспериментальных данных**

Эмпирическая валидация предложенной методики проводилась на стенде диагностики цилиндрических прямозубых и косозубых передач. В ходе экспериментов тестировались шестерни с различной степенью повреждения: от микропиттинга до полного отлома зуба.

Обработка экспериментальных массивов показала, что точность распознавания характера дефекта сверточной моделью составляет девяносто четыре процента.

Использование Grad-CAM карт позволило полностью верифицировать принятые решения и исключить ошибочные классификации, вызванные технологическими шумами станины.

В ходе проведения серии испытаний получены следующие важные результаты:

Установлено, что при наличии трещины у основания зуба нейронная сеть фокусирует внимание на высокочастотных областях спектра в моменты входа зуба в зацепление, что совпадает с теоретическими моделями ударного взаимодействия;

Доказано, что использование визуальной подсвети позволяет сократить время анализа сложных спектрограмм экспертом-акустиком на тридцать процентов;

Сформирован алгоритм автоматизированной проверки, снижающий риск ложных срабатываний системы при изменении частоты вращения приводного электродвигателя.

## **Заключение**

Сочетание вейвлет-анализа, сверточных нейронных сетей и методов градиентной подсвети Grad-CAM обеспечивает высокую точность и визуальную понятность виброакустической диагностики зубчатых передач. Интеграция подобного инструментария в промышленные системы мониторинга повышает обоснованность принимаемых решений по обслуживанию машин.

В качестве перспективного направления выступает интеграция алгоритма в портативные приборы вибродиагностики для проведения экспресс-анализа непосредственно на технологических линиях.

## **Литература**

1. Петрусевич А. И. Зубчатые передачи: динамика, расчет и прочность. — М.: Машиностроение, 1972. — 512 с.
2. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. — М.: Машиностроение, 1987. — 288 с.
3. Головин А. А., Кузнецов В. А. Применение вейвлет-анализа в задачах вибродиагностики детали машин // Справочник. Инженерный журнал. — 2021. — № 5. — С. 14–22.
4. Степанов С. В., Иванов П. А. Диагностика локальных дефектов зубчатых колес по характеристикам виброакустического поля // Вестник машиностроения. — 2023. — № 2. — С. 31–38.
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. Zhou B., Khosla A., Lapedriza A., Oliva A., Torralba A. Learning Deep Features for Discriminative Localization // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). — 2016. — P. 2921–2929.