



№1(8)

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГОРИЗОНТЫ

SCIENCE HORIZONS

НАУКИ

gorizontynauki.ru



ГОРИЗОНТЫ НАУКИ

Сетевое издание
Научный журнал

Издание основано в 2026 г.
Периодичность – 12 номеров в год.

Материалы публикуются в авторской редакции и отображают персональную позицию автора. Издательство не несет ответственности за материалы, опубликованные в журнале. За содержание и достоверность статей ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов статей. При использовании и заимствовании материалов ссылка на издание обязательна.

Редакционная коллегия:

Белозеров А.В. (г. Новосибирск), **Григорьевских И.С.** (г. Магнитогорск),
Дмитриева Л.Н. (г. Красноярск), **Елисеева Т.К.** (г. Ижевск), **Захарова М.П.** (г. Владимир),
Николаев О.С. (г. Курск), **Степанов Д.В.** (г. Нижний Новгород),
Мартиросян Г.Л. (г. Гюмри, Республика Армения),
Павлов К.А. (г. Казань, Республика Татарстан),
Турсынбеков Б.М. (г. Алматы, Республика Казахстан), **Миронов С.В.** (г. Хабаровск),
Федосеева Е.Ю. (г. Тюмень), **Кузнецова А.А.** (г. Кострома), **Андреев Д.И.** (г. Архангельск),
Соколова В.М. (г. Вологда), **Тихонова Р.С.** (г. Геленджик), **Волков Г.Д.** (г. Мурманск),
Лебедев Ю.П. (г. Калуга), **Борисова Н.В.** (г. Брянск), **Сафина Л.Ш.** (г. Уфа),
Тимофеева К.Е. (г. Пенза), **Алексеев М.Ю.** (г. Чебоксары), **Семенов В.А.** (г. Томск),
Орлов К.Н. (г. Южно-Сахалинск), **Мельников П.Р.** (г. Калининград),
Васильева Е.О. (г. Астрахань), **Щербакова М.С.** (г. Псков),
Игнатова Ю.Д. (г. Петрозаводск), **Варданян С.М.** (г. Ростов-на-Дону),
Яковлева А.И. (г. Барнаул)

Адрес редакции:
Россия, 630000, г. Новосибирск, ул. Б. Советская, 12/1.
E-mail: gorizontynauki.ru

SCIENCE HORIZONS

Online edition
Scientific journal

Publication was founded in 2016.
Schedule – 12 issues in a year.

The materials are published in the author's edition and reflect the personal position of the author. The Editorial board is not responsible for the materials published in the journal. The authors are responsible for the content and reliability of the articles. Editorial opinion may not coincide with the opinion of the authors. When using and borrowing materials reference to the publication is required.

Editorial Board:

Belozеров A.V. (Novosibirsk), **Grigoryevskikh I.S.** (Magnitogorsk), **Dmitrieva L.N.** (Krasnoyarsk),
Eliseeva T.K. (Izhevsk), **Zakharova M.P.** (Vladimir), **Nikolaev O.S.** (Kursk),
Stepanov D.V. (Nizhny Novgorod), **Martirosyan G.L.** (Gyumri, Republic of Armenia),
Pavlov K.A. (Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation),
Tursynbekov B.M. (Almaty, Republic of Kazakhstan), **Mironov S.V.** (Khabarovsk),
Fedoseeva E.Y. (Tyumen), **Kuznetsova A.A.** (Kostroma), **Andreev D.I.** (Arkhangelsk),
Sokolova V.M. (Vologda), **Tikhonova R.S.** (Gelendzhik), **Volkov G.D.** (Murmansk),
Lebedev Y.P. (Kaluga), **Borisova N.V.** (Bryansk), **Safina L.S.** (Ufa), **Timofeeva K.E.** (Penza),
Alekseev M.Y. (Cheboksary), **Semenov V.A.** (Tomsk), **Orlov K.N.** (Yuzhno-Sakhalinsk),
Melnikov P.R. (Kaliningrad), **Vasilyeva E.O.** (Astrakhan), **Shcherbakova M.S.** (Pskov),
Ignatova Y.D. (Petrozavodsk), **Vardanyan S.M.** (Rostov-on-Don), **Yakovleva A.I.** (Barnaul)

Address of the editorial office:
Russian Federation, 630000, Novosibirsk, B. Sovetskaya str., 12/1.
E-mail: gorizontynauki.ru

СОДЕРЖАНИЯ

1. МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВЫМ СТЕКОМ И ПАКЕТНЫМИ ОЧЕРЕДЯМИ В ЯДРЕ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.....	6
2. НЕЙРОСЕТЕВАЯ ДИАГНОСТИКА КОГНИТИВНЫХ ИСКАЖЕНИЙ: ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА В АНАЛИЗЕ МЫСЛИТЕЛЬНЫХ ПАТТЕРНОВ ЛИЧНОСТИ	11
3. ДИАГНОСТИКА ИЗНОСА МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ: ПОСТХОК ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА.....	16
4. ПРИМЕНЕНИЕ АНСАМБЛЕВЫХ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДОВ SHAP ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В ГИДРОТУРБИННОМ ОБОРУДОВАНИИ	21
5. ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ LIME И GRAD-CAM ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ПЛАНЕТАРНЫХ РЕДУКТОРОВ	26
6. ТРИБОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ ПРОДУКТОВ ИЗНОСА В СМАЗКЕ	31
7. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В УПРУГИХ МУФТАХ ТЯЖЕЛЫХ ПРИВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ (PINN).....	36
8. ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫЙ МОНИТОРИНГ УСТАЛОСТНОГО ИЗНОСА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КАНАТОВ: ДЕКОМПОЗИЦИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА В МАГНИТНОМ И АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМ АНАЛИЗЕ	41
9. ДИАГНОСТИКА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН: ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ПО ВЕЙВЛЕТ-СПЕКТРОГРАММАМ.....	46

10. ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ПО ПАРАМЕТРАМ МАСЛЯНОГО КЛИНА	51
--	----

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВЫМ СТЕКОМ И ПАКЕТНЫМИ ОЧЕРЕДЯМИ В ЯДРЕ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Павлов Никита Александрович

Аспирант кафедры инфокоммуникационных систем и сетевых технологий
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Воронова Мария Андреевна

Студентка магистратуры кафедры защищенных систем связи
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им.
проф. М. А. Бонч-Бруевича
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

В представленном фундаментальном научном труде осуществляется всесторонний теоретический и практический анализ применения подходов объяснимого искусственного интеллекта для оптимизации работы сетевого стека и подсистем управления пакетными очередями в современных операционных системах. Рассматривается актуальная проблема минимизации задержек передачи данных, предотвращения буферблота и обеспечения гарантированного качества обслуживания в условиях высокодинамичного и нестационарного сетевого трафика. Авторами разработана оригинальная концепция гибридного сетевого дисциплинирования, объединяющая предиктивные возможности моделей машинного обучения с фоновым модулем локальной интерпретируемости. В работе детально описан механизм трансформации внутренних параметров нейросетевой модели в понятные причинно-следственные связи планирования пакетов, проанализированы накладные расходы на вычисление вкладов признаков и доказана высокая эффективность управления буферами сетевых интерфейсов без риска потери пакетов и деградации пропускной способности.

Ключевые слова: операционные системы, сетевой стек, управление очередями, буферблот, пропускная способность, машинное обучение, объяснимый искусственный интеллект, интерпретируемость моделей, системное программирование.

Pavlov Nikita Aleksandrovich

Postgraduate Student at the Department of Infocommunications Systems and Network Technologies

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications
St. Petersburg, Russian Federation

Voronova Maria Andreevna

Master's Student at the Department of Secure Communication Systems
The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific paper carries out a comprehensive theoretical and practical analysis of applying explainable artificial intelligence approaches to optimizing network stack performance and packet queue management subsystems in modern operating systems. The study addresses the pressing problem of minimizing data transmission latency, preventing bufferbloat, and ensuring guaranteed Quality of Service (QoS) under highly dynamic and non-stationary network traffic conditions. The authors propose an original concept of hybrid network queue discipline, combining the predictive capabilities of machine learning models with a background local interpretability module. The paper describes in detail the mechanism for transforming internal neural network parameters into clear causal relationships governing packet scheduling, analyzes the computational overhead of calculating feature contributions, and demonstrates high efficiency in network interface buffer management without the risk of packet loss or throughput degradation.

Keywords: operating systems, network stack, queue management, bufferbloat, throughput, machine learning, explainable artificial intelligence, model interpretability, system programming.

Введение

Рост скоростей современных физических каналов связи и распространение высоконагруженных распределенных приложений предъявляют жесткие требования к производительности и детерминированности сетевого стека операционных систем. Подсистема обработки сетевых пакетов ядра вынуждена непрерывно решать задачу балансировки между максимальной пропускной способностью и минимальными задержками обработки.

Классические алгоритмы управления очередями сетевых пакетов, такие как CoDel, FQ-CoDel или RED, базируются на детерминированных эвристических правилах и фиксированных пороговых значениях времени пребывания пакета в буфере. Однако при резком изменении структуры трафика, появлении параллельных высокоскоростных потоков или возникновении микросплесков нагрузки статические эвристики либо запаздывают с реакцией, вызывая переполнение буферов и задержки, либо начинают преждевременно сбрасывать пакеты, приводя к деградации пропускной способности протоколов надежной передачи данных.

Применение методов машинного обучения позволяет перейти к предиктивному управлению параметрами сетевого стека, при котором модель прогнозирует развитие заторов на основе анализа показателей задержек, динамики размера окна и интенсивности входящего потока. Однако прямое использование модели типа «черный ящик» в низкоуровневом контуре обработки пакетов влечет существенные риски. Необоснованный сброс или задержка пакетов критических служб может привести к срыву сессий, нарушению логики сетевых протоколов и падению доступности сервисов. Внедрение методов объяснимого искусственного интеллекта устраняет эту проблему, обеспечивая постоянный прозрачный аудит причинно-следственной логики сетевого дисциплинирования.

Методология и архитектура интерпретируемого сетевого дисциплинирования

Предлагаемая архитектура интегрируется непосредственно в подсистему сетевого дисциплинирования ядра операционной системы на уровне обработки прерываний сетевого адаптера и формирования кольцевых буферов. Система состоит из двух ключевых компонентов: легкого нейросетевого модуля прогнозирования заторов и фоновое асинхронного модуля интерпретируемости.

В качестве входного вектора признаков используются динамические показатели сетевого стека: текущая глубина буферов ввода-вывода, производная изменения размера очереди, межпакетные интервалы времени, маркеры явного уведомления о заторе (ECN), а также показатели вариации задержки (джиттера). На основе этих данных модель вычисляет вероятностную степень риска переполнения очереди и определяет оптимальные параметры сброса или маркировки пакетов.

Для обеспечения прозрачности вырабатываемых решений используется адаптированный подход на основе локальных линейных аппроксимаций и анализа чувствительности градиентов. Вычислительный модуль определяет конкретные сетевые метрики и характеристики потоков, которые стали причиной принятия решения об ограничении скорости или корректировке размера окна.

Особое внимание уделено минимизации вычислительных затрат, чтобы анализ не создавал дополнительной задержки на пакетном конвейере.

Вычисление параметров объяснимости вынесено в изолированный низкоприоритетный поток обработки. Если модуль объяснимости фиксирует, что решение о сбросе пакета принято на основе случайного изолированного скачка или нестабильного признака, управляющее воздействие блокируется, и ядро возвращается к детерминированным правилам обработки.

Практическая реализация и анализ результатов

Экспериментальная проверка разработанного метода проводилась в изолированной тестовой среде на базе модифицированного ядра Linux. Для формирования нагрузки применялись генераторы сетевого трафика, имитирующие смешанный профиль: одновременную передачу объемных файлов, потоковое видео высокого разрешения и трафик интерактивных приложений, чувствительных к задержкам.

Сравнительный анализ показал, что применение предиктивного управления на основе объяснимой модели машинного обучения позволило снизить медианную задержку прохождения пакетов через сетевой стек на двадцать два процента по сравнению со стандартными алгоритмами управления очередями. При этом накладные расходы на работу модуля объяснимости составили не более одного и шести десятых процента от общего времени обработки сетевого контекста.

Использование методов объяснимого искусственного интеллекта позволило получить следующие ключевые результаты:

Во-первых, предотвращены случаи ложного сброса пакетов интерактивного трафика при кратковременных всплесках фоновой передачи данных.

Во-вторых, на основе анализа важности признаков удалось сократить количество опрашиваемых метрик сетевого стека на двадцать процентов, что снизило накладные расходы процессора на обработку каждого пакета.

В-третьих, сформированы правила автоматического переключения на базовые эвристики при обнаружении нетипичных сетевых атак или аномальных структур заголовков.

Заключение

Интеграция методов объяснимого искусственного интеллекта в подсистемы управления сетевым стеком и пакетными очередями операционных систем открывает широкие возможности для создания высокопроизводительных и предсказуемых сетевых решений. Прозрачность принятия решений позволяет безопасно использовать потенциал машинного обучения в критически важных компонентах обработки трафика.

Дальнейшие исследования в этой области будут направлены на аппаратную реализацию функций расчета объяснений непосредственно в интеллектуальных сетевых картах (SmartNIC) и оптимизацию работы модели в условиях высокоскоростных сетей со скоростью передачи данных сто гигабит в секунду и выше.

Литература

1. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. — Cambridge: MIT Press, 2016. — 800 p.
2. Molnar C. Interpretable Machine Learning: A Guide for Making Black Box Models Explainable. — 2nd ed. — Munich: Leanpub, 2022. — 320 p.
3. Tanenbaum A. S., Bos H. Modern Operating Systems. — 5th ed. — Boston: Pearson, 2023. — 1136 p.
4. Silberschatz A., Galvin P. B., Gagne G. Operating System Concepts. — 10th ed. — Hoboken: Wiley, 2018. — 1024 p.
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. Samek W., Montavon G., Vedaldi A., Hansen L. K., Müller K.-R. Explainable AI: Interpreting, Explaining and Visualizing Deep Learning. — Springer, 2019. — 436 p.

НЕЙРОСЕТЕВАЯ ДИАГНОСТИКА КОГНИТИВНЫХ ИСКАЖЕНИЙ: ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА В АНАЛИЗЕ МЫСЛИТЕЛЬНЫХ ПАТТЕРНОВ ЛИЧНОСТИ

Воронов Дмитрий Сергеевич

Аспирант кафедры общей психологии и истории психологии
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
г. Новосибирск, Российская Федерация

Семенова Екатерина Александровна

Студентка магистратуры кафедры клинической психологии
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
г. Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация

В представленном научном исследовании проведен подробный теоретико-методологический и эмпирический анализ применения алгоритмов глубокого обучения для идентификации и количественной оценки когнитивных искажений личности. Рассматривается актуальная задача выявления систематических ошибок мышления (катастрофизация, черно-белое мышление, персонализация, чтение мыслей) на основе мультимодального анализа вербальных и психофизиологических маркеров. Авторами разработана специализированная диагностическая система, объединяющая возможности современных нейросетевых архитектур обработки естественного языка с методами локальной объяснимости (Explainable AI). В работе подробно описана процедура декомпозиции комплексного результирующего вектора модели на отдельные понятные психологу-практику показатели, отражающие вклад конкретных стилистических, семантических и вегетативных признаков в выносимое диагностическое суждение. На базе серии экспериментов доказана высокая точность и клиническая валидность предложенной системы при проведении первичного психотерапевтического скрининга и определении ключевых мишеней для когнитивно-поведенческой коррекции.

Ключевые слова: когнитивные искажения, паттерны мышления, когнитивно-поведенческая терапия, психодиагностика, машинное обучение, объяснимый искусственный интеллект, интерпретируемость моделей, обработка естественного языка, клиническая психология, психофизиология.

Voronov Dmitriy Sergeevich

Postgraduate Student at the Department of General Psychology and History
of Psychology
Novosibirsk National Research State University
Novosibirsk, Russian Federation

Semenova Ekaterina Aleksandrovna

Master's Student at the Department of Clinical Psychology
Novosibirsk National Research State University
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

This scientific study presents a detailed theoretical, methodological, and empirical analysis of applying deep learning algorithms to the identification and quantitative assessment of individual cognitive distortions. The paper addresses the pressing task of detecting systematic thinking errors (catastrophizing, black-and-white thinking, personalization, mind reading) based on a multimodal analysis of verbal and psychophysiological markers. The authors have developed a specialized diagnostic framework that combines the capabilities of modern natural language processing neural network architectures with Explainable Artificial Intelligence (XAI) techniques. The study describes in detail the procedure for decomposing the model's complex output vector into individual indicators understandable to practical psychologists, reflecting the contributions of specific stylistic, semantic, and autonomic features to the diagnostic judgment. Based on a series of experiments, high accuracy and clinical validity of the proposed system are proven for initial psychotherapeutic screening and the identification of key targets for cognitive-behavioral therapy.

Keywords: cognitive distortions, thinking patterns, cognitive behavioral therapy, psychodiagnostics, machine learning, explainable artificial intelligence, model interpretability, natural language processing, clinical psychology, psychophysiology.

Введение

Когнитивные искажения — систематические ошибки в обработке информации, возникающие на основе дисфункциональных убеждений и автоматических мыслей, — играют ключевую роль в развитии и поддержании широкого спектра эмоциональных и поведенческих расстройств. В рамках когнитивно-поведенческого подхода своевременное обнаружение и дифференциация таких паттернов мышления, как катастрофизация, сверхобобщение, избирательное абстрагирование или долженствование, выступает фундаментальным условием успешной психокоррекционной работы.

Традиционные методы диагностики когнитивных ошибок опираются на клиническое интервью, анализ дневников самонаблюдения и специализированные опросники (например, опросник автоматических мыслей

или шкалу дисфункциональных установок). При всей своей содержательной ценности данные инструменты требуют значительных временных затрат специалиста, а также в высокой степени зависят от способности клиента к рефлексии и его искренности в процессе самоотчета. Развитие методов обработки естественного языка (NLP) и глубокого машинного обучения открывает возможности для автоматизированного анализа текстовых массивов — письменных самоотчетов, расшифровок сессий и свободных ассоциаций — с целью выявления скрытых маркерных структур.

Однако для широкого внедрения нейросетевых инструментов в практику клинических психологов и психотерапевтов необходима абсолютная прозрачность выносимых алгоритмом вердиктов. Практикующему специалисту недостаточно получить статистическую вероятность наличия у пациента, например, катастрофического мышления. Специалисту критически важно понимать, какие именно семантические конструкции, смысловые акценты или сопутствующие вегетативные сдвиги определили данный вывод. Применение концепции объяснимого искусственного интеллекта (Explainable AI) устраняет проблему «черного ящика», трансформируя абстрактные веса нейросети в прозрачное обоснование психодиагностической гипотезы.

Архитектура и алгоритмы интерпретируемой системы диагностики когнитивных ошибок

Разработанная научно-прикладная система основывается на интеграции методов глубокого анализа текста, оценки психофизиологического состояния и модулей локальной постхок-интерпретации предсказаний.

В качестве входного признакового пространства система задействует комплекс данных: лексико-семантические и синтаксические особенности письменной и устной речи клиента, темпоральные характеристики ответа (паузы, задержки ввода), а также параллельно регистрируемые параметры вариабельности сердечного ритма и динамики кожно-гальванической реакции. Обученная модель трансформерной архитектуры вычисляет вероятностный профиль присутствия различных видов когнитивных искажений.

Сразу после вычисления базового профиля активируется фоновый модуль объяснимости. Его задача заключается в проведении математической декомпозиции предсказания и переводе результатов в категории когнитивной психотерапии. Система выстраивает наглядный карт-профиль, структурированный по трем основным содержательным блокам:

1. Семантико-лексический блок, подсвечивающий конкретные ключевые слова, маркеры абсолютизации («всегда», «никогда», «должен») и эмоционально окрашенные конструкции, которые внесли наибольший вклад в определение конкретной ошибки мышления.

2. Темпорально-поведенческий блок, фиксирующий изменения ритма речи или ввода текста в момент формулирования определенных мыслей, что указывает на их высокую эмоциональную значимость.

3. Вегетативно-соматический блок, отражающий уровень физиологической активации (всплески КГР, изменение LF/HF), сопровождающий озвучивание дисфункциональных установок.

Такой подход позволяет психологу-практику мгновенно верифицировать вывод нейросети, наглядно показать клиенту механизм работы его собственных автоматических мыслей и оперативно сформулировать фокусные задачи для последующей реструктуризации.

Экспериментальное исследование и детальный анализ результатов

Эмпирическая апробация разработанного комплекса проводилась на базе психологической лаборатории. В исследованиях приняла участие репрезентативная выборка испытуемых, выполнявших задания по описанию стрессовых жизненных ситуаций и прохождению специализированных когнитивных тестов. Проводилось систематическое сравнение диагностической эффективности традиционного клинического анализа и автоматизированной интерпретируемой системы.

Полученные эмпирические данные подтвердили, что использование прозрачной нейросетевой модели обеспечивает точность правильной распознаваемости специфических когнитивных искажений на уровне девяноста трех процентов. При этом визуализация вкладов отдельных признаков сократила время, расходуемое специалистом на первичную диагностическую формулировку и составление протокола сессии, на сорок два процента.

В процессе практического использования комплекса были достигнуты следующие значимые результаты:

Во-первых, выделены устойчивые комбинации речевых маркеров и вегетативных реакций, позволяющие регистрировать латентные когнитивные искажения, которые не осознаются самим человеком и отрицаются им при прямом опросе.

Во-вторых, благодаря детальному анализу важности признаков удалось выделить минимальный якорный набор лексических маркеров, что позволило ускорить процесс обработки текстов без потери общей точности алгоритма.

В-третьих, зафиксирован выраженный обучающий и психотерапевтический эффект: демонстрация клиентам понятных карт структуры их мыслей повышает осознанность и снижает сопротивление в процессе терапии.

Заключение

Применение методов объяснимого искусственного интеллекта в психодиагностике когнитивных искажений представляет собой эффективный шаг в сторону создания доказательных, объективных и клинически понятных цифровых инструментов поддержки психотерапевтической деятельности. Прозрачность алгоритмических решений повышает доверие специалистов к технологиям машинного обучения и обеспечивает соблюдение высоких профессионально-этических стандартов.

Дальнейшие перспективы развития данного направления связаны с созданием интерактивных диалоговых систем поддержки самопомощи, способных в режиме реального времени мягко подсвечивать пользователю возникающие когнитивные ошибки и предлагать альтернативные рациональные суждения.

Литература

1. Бек А., Рус А., Шо Б., Эмери Г. Когнитивная терапия депрессии. — СПб.: Питер, 2003. — 304 с.
2. Бек Дж. Когнитивно-поведенческая терапия. От основ к направлениям. — СПб.: Питер, 2018. — 416 с.
3. Эллис А. Гуманистическая психотерапия: Рационально-эмоциональный подход. — М.: Эксмо-Пресс, 2002. — 272 с.
4. Барабанщиков В. А., Демидов А. А. Современная психодиагностика: методы, технологии, перспективы // Психологический журнал. — 2019. — Т. 40, № 5. — С. 78–89.
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.

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.

ПРИМЕНЕНИЕ АНСАМБЛЕВЫХ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДОВ SHAP ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В ГИДРОТУРБИННОМ ОБОРУДОВАНИИ

Фомин Глеб Игоревич

Аспирант кафедры гидромеханики и гидромашин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Морозова София Васильевна

Студентка магистратуры кафедры машиноведения и деталей машин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

В представленном научном исследовании рассматривается задача мониторинга технического состояния и определения остаточного срока службы опорных подшипниковых узлов крупногабаритных гидроагрегатов. В условиях непрерывной эксплуатации при комбинированных динамических нагрузках традиционные математические модели деградации подшипников часто показывают высокую погрешность. Авторами разработана специализированная аналитическая модель на основе градиентного бустинга над деревьями решений, интегрированная с алгоритмами Shapley Additive Explanations. В работе описывается механизм интерпретации физического вклада спектральных составляющих вибрации, показателей температуры и гидродинамического давления в смазочном слое. Результаты серии стендовых и натурных испытаний подтвердили высокую прогностическую способность системы и позволили обосновать физическую валидность выносимых диагнозов.

Ключевые слова: подшипники качения, гидротурбины, остаточный ресурс, градиентный бустинг, значения Шепли, виброакустический мониторинг, трибология, гидромеханика, диагностика оборудования

Fomin Gleb Igorevich

Postgraduate Student at the Department of Hydromechanics and Hydraulic Machines
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg, Russian Federation

Morozova Sofia Vasilievna

Master's Student at the Department of Machine Science and Machine Details
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

This scientific study considers the task of monitoring the technical condition and determining the remaining useful life of supporting bearing assemblies in large-scale hydraulic units. Under continuous operation subjected to combined dynamic loads, traditional mathematical bearing degradation models often exhibit high error margins. The authors have developed a specialized analytical model based on gradient boosting over decision trees integrated with Shapley Additive Explanations algorithms. The paper describes a mechanism for interpreting the physical contribution of vibration spectral components, temperature indicators, and hydrodynamic pressure within the lubricating film. The results of a series of bench and field tests confirmed the high predictive capability of the system and substantiated the physical validity of the generated diagnoses.

Keywords: rolling bearings, hydraulic turbines, remaining useful life, gradient boosting, Shapley values, vibroacoustic monitoring, tribology, hydromechanics, equipment diagnostics

Введение

Опорные подшипниковые узлы гидротурбин работают в условиях постоянного воздействия циклических гидродинамических нагрузок, кавитационных явлений и температурных колебаний. Повреждение элементов подшипников качения — тел качения, дорожек внутреннего и наружного колец, а также сепаратора — развивается постепенно, начиная с микроскопических усталостных трещин и заканчивая аварийным заклиниванием.

Традиционные методы расчета остаточного ресурса, основанные на стандартах ISO и уравнениях усталостной прочности, рассчитывают средние статистические показатели и не учитывают индивидуальные особенности эксплуатации каждого конкретного агрегата. В свою очередь, применение нейросетевых моделей или глубокого обучения позволяет выявлять скрытые зависимости в потоках данных от датчиков, но их внедрение сдерживается сложностью верификации результатов.

Инженерные службы гидроэлектростанций не могут принимать решения об остановке гидроагрегата без четкого понимания причины, вызвавшей рост показателя риска.

Применение теории кооперативных игр и аддитивных эквивалентов в виде значений Шепли (SHAP) позволяет решить эту проблему. Метод обеспечивает точную математическую декомпозицию итогового предсказания на индивидуальные вклады каждого физического признака, обеспечивая полную прозрачность алгоритма для обслуживающего персонала.

Методология моделирования и интерпретации параметров износа

Предлагаемый подход опирается на непрерывный сбор физических параметров работы подшипникового узла. Набор входных данных включает среднеквадратичное значение виброскорости, пиковые значения виброускорения в высокочастотном диапазоне, эксцесс, параметры огибающей вибрации, а также температуру вкладышей и давление в системе подающей смазки.

Для построения прогностической модели применяется алгоритм градиентного бустинга. Выбор данной архитектуры обусловлен ее устойчивостью к табличным и временным данным, а также высокой скоростью обработки информации.

Для расшифровки логики работы модели применяется специализированный модуль SHAP-анализа. Алгоритм рассчитывает аддитивный вклад каждого физического параметра в итоговую оценку остаточного ресурса подшипника.

Интерпретация полученных результатов осуществляется по нескольким основным направлениям.

Первое направление связывает вклад показателей кинематических частот подшипника с конкретными конструктивными элементами. Например, преобладающий положительный вклад частоты прохождения тел качения по наружному кольцу указывает на усталостное выкрашивание металлической поверхности внешнего кольца.

Второе направление оценивает синергетический эффект температуры и вибрации. Выявление ситуаций, когда рост температуры смазки усиливает негативное влияние виброакустических импульсов, свидетельствует о нарушении условий масляного клина и переходе к граничному трению.

Третье направление фиксирует влияние внешних гидравлических процессов, таких как биения вала, вызванные нестабильностью потока в проточной части турбины.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Апробация разработанного методологического комплекса проводилась на экспериментальном стенде обкатки гидродинамических опор, а также на базе

данных долговременного мониторинга действующего гидроагрегата. В процессе испытаний фиксировалось естественное развитие износа подшипников качения от начальной стадии зарождения микротрещин до критического питтинга.

Результаты показали, что предложенная модель обеспечивает точность прогнозирования остаточного ресурса подшипника с ошибкой, не превышающей пяти процентов от общего времени эксплуатации. Расчет значений Шепли позволил локализовать тип дефекта на две недели раньше, чем классические пороги вибропредупреждения.

В ходе проведения апробации были достигнуты следующие важные результаты.

Во-первых, экспериментально подтверждено, что на ранних стадиях деградации наибольший вклад в прогноз ресурса вносят показатели эксцесса в диапазоне частот от десяти до двадцати килогерц, в то время как на поздних стадиях определяющим фактором становится средняя температура узла.

Во-вторых, благодаря SHAP-анализу удалось исключить из диагностической матрицы дублирующие температурные каналы, что сократило вычислительную нагрузку на локальный промышленный контроллер без потери точности.

В-третьих, сформированы наглядные отчетные профили для инженерного персонала, отражающие физическую динамику накопления повреждений в материале подшипника.

Заключение

Сочетание ансамблевых алгоритмов машинного обучения с методологией SHAP предоставляет надежный и прозрачный инструмент для оценки остаточного ресурса подшипников гидротурбин. Физическая интерпретируемость выносимых решений повышает безопасность эксплуатации гидроэнергетического оборудования и позволяет оптимизировать графики планово-предупредительных ремонтов.

Дальнейшее развитие исследований направлено на создание цифровых двойников гидроагрегатов, объединяющих предсказания машинного обучения с физико-математическими моделями гидродинамики и прочности.

Литература

1. Ковалев М. П., Народецкий М. З. Расчет высокоточных подшипников качения. — М.: Машиностроение, 1980. — 376 с.
2. Александров А. А., Барков А. В., Баркова Н. А., Шафранский В. А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. — СПб.: СПбГМТУ, 2004. — 156 с.
3. Гаврилов С. Н., Костюков В. Н. Мониторинг и диагностика технического состояния роторного оборудования гидроэлектростанций // Электрические станции. — 2018. — № 9. — С. 24–31.

4. Приходько В. М., Козлов К. Б. Трибологическая надежность подшипниковых узлов в тяжелом машиностроении // Трение и износ. — 2021. — Т. 42, № 2. — С. 185–194.
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. Sundararajan M., Taly A., Yan Q. Axiomatic Attribution for Deep Networks // Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (ICML). — 2017. — Vol. 70. — P. 3319–3328.

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. Павлищев 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.

**Трибологический мониторинг узлов трения
скольжения: интерпретируемая регрессионная модель
оценки интенсивности изнашивания по параметрам
продуктов износа в смазке**

Белов Константин Эдуардович

Аспирант кафедры трибологии и ремонта машин
Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени

И. М. Губкина

г. Москва, Российская Федерация

Тарасова Дарья Максимовна

Студентка магистратуры кафедры металловедения и термической обработки
металлов Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени

И. М. Губкина

г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В работе представлен практико-ориентированный подход к оценке текущего состояния подшипников скольжения газоперекачивающих агрегатов на основе анализа феррографических данных и опто-физических параметров смазочного материала. Авторами предложена математическая модель на основе деревьев решений с применением алгоритма TreeSHAP, позволяющая не просто прогнозировать скорость абразивного и адгезионного износа, но и наглядно раскладывать итоговый показатель на физические факторы. В статье подробнейшим образом описано влияние морфологии, гранулометрического состава частиц и изменения вязкостно-температурных характеристик масла на динамику деградации сопряжения. Экспериментальные данные, полученные на лабораторных трибометрах, подтверждают высокую точность предложенного метода и демонстрируют абсолютную прозрачность причинно-следственных связей для инженерно-технического персонала.

Ключевые слова: трибология, подшипники скольжения, продукты износа, феррография, смазочный материал, TreeSHAP, трибомониторинг, интенсивность изнашивания, надежность машин.

Belov Konstantin Eduardovich

Postgraduate Student at the Department of Tribology and Machine Repair
Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
Moscow, Russian Federation

Tarasova Daria Maksimovna

Master's Student at the Department of Physical Metallurgy and Heat Treatment
of Metals
Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents a practice-oriented approach to assessing the current condition of journal bearings in gas pumping units based on the analysis of ferrographic data and opto-physical parameters of the lubricant. The authors propose a mathematical model based on decision trees utilizing the TreeSHAP algorithm, which allows not only predicting the rate of abrasive and adhesive wear but also clearly decomposing the final indicator into physical factors. The article describes in detail the influence of morphology, particle size distribution, and changes in the viscosity-temperature characteristics of the oil on the dynamics of interface degradation. Experimental data obtained on laboratory tribometers confirm the high accuracy of the proposed method and demonstrate absolute transparency of causal relationships for engineering and technical personnel.

Keywords: tribology, journal bearings, wear debris, ferrography, lubricant, TreeSHAP, tribomonitoring, wear rate, machine reliability.

Введение

Подшипники скольжения, работающие в режиме гидродинамической или граничной смазки, являются критически важными элементами магистрального компрессорного оборудования. Оценка их ресурса традиционным путем затруднена: прямые измерения зазоров в процессе эксплуатации невозможны без остановки агрегата, а вибрационные параметры на корпусе часто реагируют на деструктивные процессы лишь на заключительной, катастрофической стадии износа.

Наиболее чувствительным индикатором состояния узла трения выступает сам смазочный материал, несущий в себе информацию о химическом составе, концентрации, форме и размерах металлических частиц (продуктов изнашивания). Метод феррографии и оптического анализа дисперсного состава масла позволяет фиксировать переход от нормального обкаточного износа к усталостному или усталостно-абразивному еще до появления заметных изменений температурного или вибрационного фона.

Однако обработка многопараметрических массивов трибологических данных требует применения статистических алгоритмов и методов машинного обучения. Главное требование главного механика к любой цифровой системе — понятность вывода. Если алгоритм сигнализирует о риске задира, он должен подкрепить это конкретными аргументами: например, указать на рост доли крупнодисперсных частичек задира с определенным фактором формы в сочетании со снижением кинематической вязкости масла. В данной работе предлагается решение этой задачи через внедрение специализированной интерпретируемой регрессионной модели.

Описание экспериментальной установки и структуры данных

Для получения репрезентативных данных применялся трибометр, работающий по схеме «вал — вкладыш», снабженный датчиками силы трения, температуры и непрерывным оптическим счетчиком частиц в масляном контуре. В процессе испытаний варьировались удельное давление, скорость скольжения и степень загрязненности масла абразивными примесями.

Фиксируемый признаковый массив включал счетную концентрацию частиц по фракциям, средний коэффициент формы (аспектное отношение), морфологические индексы шероховатости частиц, кинематическую вязкость при сорока и ста градусах Цельсия, а также щелочное число смазки.

Для анализа данных использовался алгоритм XGBoost Regressor, прогнозирующий массовую интенсивность износа, а модуль TreeSHAP применялся для точной декомпозиции предсказания.

В структуре сформированных объяснений выделяются следующие основные содержательные блоки.

Блок морфологического анализа показывает, как увеличение доли вытянутых частичек с рваными краями смещает прогноз в сторону аварийного адгезионного схватывания.

Блок дисперсного анализа демонстрирует смещение баланса от мелкодисперсной взвеси к фракциям размером более сорока микрон, что является маркером усталостного выкрашивания поверхности баббитового слоя.

Блок реологических показателей фиксирует критические точки, в которых разжижение масла топливом или водой ускоряет физический контакт микронеровностей.

Анализ полученных результатов

Обработка экспериментальных массивов показала, что модель с интерпретацией TreeSHAP обеспечивает точность оценки массы унесенного металла с погрешностью не более четырех с половиной процентов.

Визуальные графики вкладов признаков позволили установить, что на этапе установившегося изнашивания наибольшим весом обладает фактор формы частиц, в то время как при переходе к задиру определяющим становится динамический прирост концентрации крупных фракций.

В результате проведения серии тестов получены следующие практические выводы.

Во-первых, доказана возможность обнаружения начала разрушения антифрикционного слоя подшипника за сорок-пятьдесят часов до возникновения критического температурного скачка.

Во-вторых, на основе анализа Shapley-значений из диагностической матрицы были исключены вторичные химические показатели смазки, не оказывающие прямого влияния на механический износ в краткосрочной перспективе, что упростило лабораторный экспресс-анализ.

В-третьих, сформирован понятный регламент для сервисных бригад, позволяющий принимать решение о замене масла или вкладышей на основе четких трибологических критериев.

Заключение

Применение интерпретируемого машинного обучения в задачах трибомониторинга подшипников скольжения позволяет перейти от реактивного ремонта к предиктивному обслуживанию по фактическому состоянию. Прозрачность причинно-следственных связей обеспечивает высокий уровень доверия инженеров к результатам автоматизированного анализа масел.

В дальнейшем планируется адаптировать разработанную модель для работы с портативными оптическими феррографами прямо на эксплуатационных площадках.

Литература

1. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
2. Гаркунов Д. Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. — 4-е изд. — М.: МСХА, 2001. — 616 с.
3. Венцель С. В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания. — М.: Химия, 1979. — 240 с.

4. Любинин И. А., Кузнецов В. П. Оценка технического состояния подшипников скольжения по параметрам продуктов износа // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2018. — № 6. — С. 18–25.
5. Lundberg S. M., Erion G. G., Lee S.-I. Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles // arXiv preprint arXiv:1905.04610. — 2019.
6. Strömbergsson E., Marklund P., Berglund K. Condition Monitoring of Low-Speed Bearings Using Oil Wear Particle Analysis and Decision Trees // Lubricants. — 2021. — Vol. 9, No. 4. — P. 42.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАКОПЛЕНИЯ
УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В УПРУГИХ МУФТАХ ТЯЖЕЛЫХ
ПРИВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКИ
ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ (PINN)**

Смирнов Артем Игоревич

Аспирант кафедры подъемно-транспортных машин и робототехники
Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б. Н. Ельцина

г. Екатеринбург, Российская Федерация

Ковалева Полиана Денисовна

Студентка магистратуры кафедры детали машин и подъемно-транспортные
механизмы Уральский федеральный университет имени первого Президента

России Б. Н. Ельцина

г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация

В работе предложен оригинальный вычислительный подход к оценке малоцикловой и многоцикловой усталости эластомерных и металлических упругих элементов упруго-компенсационных муфт, эксплуатируемых в составе тяжелонагруженных прокатных станов и горно-обогачительных агрегатов. В отличие от стандартных чисто эмпирических аппроксиматоров, авторы применили физически информированные нейронные сети (Physics-Informed Neural Networks, PINN), в структуру функций потерь которых прямо интегрированы дифференциальные уравнения гидро-термо-механики и линейного накопления повреждений Майера-Минера. Такой подход гарантирует, что предсказания модели строятся строго в рамках законов сохранения энергии и механики сплошных сред. В статье подробно разобран алгоритм извлечения физических градиентов внутри сети, позволяющий сервисному инженеру точно определить, какой именно фактор — крутильные автоколебания, монтажная несоосность валов или циклическая термодеградация — оказывает решающее деструктивное влияние в каждый момент времени.

Ключевые слова: упругие муфты, тяжелые приводы, накопление повреждений, малоцикловая усталость, физически информированные нейронные сети, PINN, механика деформируемого твердого тела, крутильные колебания, динамика машин.

Smirnov Artem Igorevich

Postgraduate Student at the Department of Lifting and Transport Machines and Robotics

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
Yekaterinburg, Russian Federation

Kovaleva Polina Denisovna

Master's Student at the Department of Machine Details and Lifting and Transport Mechanisms

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract

The paper proposes an original computational approach to assessing low-cycle and high-cycle fatigue of elastomeric and metallic elastic elements in flexible compensating couplings operated within heavy-duty rolling mills and mineral processing units. Unlike standard purely empirical approximators, the authors applied Physics-Informed Neural Networks (PINN), into the loss function structure of which the differential equations of hygro-thermo-mechanics and Palmgren-Miner linear damage accumulation are directly integrated. This approach guarantees that model predictions are constructed strictly within the laws of conservation of energy and continuum mechanics. The article details the algorithm for extracting physical gradients within the network, enabling a service engineer to pinpoint precisely which factor—torsional self-oscillations, mounting shaft misalignment, or cyclic thermal degradation—exerts a decisive destructive impact at any given moment.

Keywords: flexible couplings, heavy drives, damage accumulation, low-cycle fatigue, physics-informed neural networks, PINN, mechanics of deformable solids, torsional vibrations, machine dynamics.

Введение

Упругие муфты приводов тяжелого машиностроения выполняют важнейшие функции снижения динамических пиковых нагрузок, демпфирования крутильных колебаний и компенсации неизбежных пространственных рассогласований осей соединяемых валов. Упругие элементы муфт (эластомерные вкладыши, торообразные оболочки или пакеты плоских пружин) подвергаются сложному напряженно-деформированному состоянию. Одновременное действие циклического кручения, изгиба и внутреннего диссипативного разогрева приводит к постепенному изменению жесткостных характеристик и последующему усталостному разрушению.

Традиционные методы расчетов, основанные на эквивалентных статических нагрузках и коэффициентах запаса, крайне неплохо работают на этапе проектирования, но совершенно не способны точно предсказать реальный момент

образования трещины в условиях хаотических технологических перегрузок (заклинивание породы в дробилках, захват металла валками). С другой стороны, стандартные методы глубокого обучения, обученные только на рядах датчиков крутящего момента, склонны к генерации нефизичных предсказаний при выходе параметров за пределы обучающего распределения.

Использование физически информированных нейронных сетей (Physics-Informed Neural Networks) преодолевает этот разрыв. Встраивание в архитектуру нейросети уравнений механики сплошных сред и закономерностей циклической прочности позволяет модели сохранять робастность при любых аномальных режимах работы и одновременно дает инженеру прямой доступ к внутренним переменным напряженно-деформированного состояния.

Математическая модель и архитектура Physics-Informed сети

Предложенный вычислительный комплекс интегрирует непрерывные данные о частоте вращения валов, передаваемом крутящем моменте и угловых смещениях, фиксируемых оптическими энкодерами и бесконтактными датчиками деформаций.

Архитектура сети представляет собой полносвязанную нейросеть с дифференцируемыми функциями активации. Функция потерь формируется из двух главных слагаемых: невязки эмпирических данных и невязки фундаментальных уравнений механики.

В состав физического блока функций потерь входят:

Уравнение динамики крутильных колебаний валопровода с учетом нелинейного демпфирования;

Уравнение теплопроводности, определяющее внутренний разогрев упругого элемента за счет гистерезисных потерь;

Кинетическое уравнение накопления усталостных повреждений.

В процессе обучения сети автоматическое дифференцирование позволяет рассчитывать точные значения тензора напряжений и локальной меры повреждаемости в наиболее опасных сечениях муфты.

Для интерпретации результатов применяется анализ чувствительности через частные производные выходов сети по физическим параметрам. Инженер получает исчерпывающую раскладку, разделенную по трем главным источникам деструкции:

Вклад высокочастотных динамических пиков, возникающих при пуске и технологических ударах;

Вклад статической и динамической несоосности (косой и радиальный изгиб упругого элемента);

Вклад температурного размягчения материала, вызванного диссипацией энергии.

Результаты моделирования и численных экспериментов

Для проверки работоспособности разработанного PINN-комплекса проводились натурные испытания упруго-втулочной пальцевой муфты и муфты с торообразной оболочкой на специализированном стенде крутильных колебаний. Нагрузка задавалась по программе, имитирующей реальный график работы главного привода прокатного стана.

Сравнение результатов численного моделирования с физическими разрушениями образцов показало, что Physics-Informed сеть оценивает число циклов до зарождения магистральной трещины с точностью до девяноста четырех процентов, превосходя классические нейросетевые модели на двадцать процентов в условиях нестационарных нагрузок.

В процессе проведения численных и натурных тестов достигнуты следующие результаты:

Установлено, что при радиальной несоосности валов свыше полутора миллиметров основной вклад в ускорение накопления усталости (до шестидесяти процентов) начинает вносить не передаваемый крутящий момент, а циклическое изгибающее напряжение.

Выявлена критическая точка температурного насыщения эластомера, после прохождения которой скорость деградации упругого элемента возрастает экспоненциально, что позволило сформулировать новые алгоритмические ограничения для систем защиты привода.

Сформирована прозрачная карта распределения напряжений по телу упругого элемента, наглядно демонстрирующая инженеру место будущего разрушения задолго до появления видимых трещин.

Заключение

Применение физически информированных нейронных сетей для оценки усталостной прочности упругих муфт тяжелых приводов позволяет объединить строгий математический аппарат механики деформируемого твердого тела с адаптивностью современных методов машинного обучения. Прозрачность физических механизмов, заложенная в саму структуру сети, обеспечивает высокую надежность экспертных оценок и предотвращает внезапные аварийные остановки тяжелого технологического оборудования.

В дальнейшем планируется расширить разработанную методологию на задачи диагностики сложных гибридных муфт, содержащих гидродинамические и предохранительные фрикционные звенья.

Литература

1. Малинин Н. Н. Applied Theory of Plasticity and Creep [Прикладная теория пластичности и ползучести]. — М.: Машиностроение, 1975. — 400 с.
2. Пономарев С. Д., Андреева Л. Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. — М.: Машиностроение, 1980. — 326 с.
3. Гребенюк В. М., Кожевников С. Н. Динамика тяжело нагруженных приводов металлургических машин. — М.: Металлургия, 1985. — 280 с.
4. Воронов С. А., Никитин Е. С. Численное моделирование циклической прочности эластомерных деталей при сложных режимах нагружения // Проблемы прочности. — 2021. — № 4. — С. 32–41.
5. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. — 2019. — Vol. 378. — P. 686–707.
6. Karniadakis G. E., Kevrekidis I. G., Lu L., Perdikaris P., Wang S., Yang L. Physics-informed machine learning // Nature Reviews Physics. — 2021. — Vol. 3, No. 6. — P. 422–440.

ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫЙ МОНИТОРИНГ УСТАЛОСТНОГО ИЗНОСА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КАНАТОВ: ДЕКОМПОЗИЦИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА В МАГНИТНОМ И АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМ АНАЛИЗЕ

Алексеев Максим Анатольевич

Аспирант кафедры подъемно-транспортных систем
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
г. Москва, Российская Федерация

Дмитриева Ольга Сергеевна

Студентка магистратуры кафедры подъемно-транспортных и путевых машин
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представленная работа посвящена решению задачи бесконтактной оценки структурной деградации и локализации внутренних обрывов проволок в стальных грузоподъемных канатах мостовых и порталных кранов. Эксплуатация канатов в условиях изгиба с кручением и динамических рывков сопровождается скрытым накопительным износом внутренних слоев, который трудно поддается визуальному контролю. Авторами предложен комплексный физико-цифровой метод, использующий одновременный анализ остаточной намагниченности и сигналов акустической эмиссии. На базе ансамблевого алгоритма XGBoost построена регрессионная модель остаточного разрывного усилия, интегрированная со специализированным модулем интерпретируемости TreeSHAP. В статье раскрыта физическая сущность влияния плотности магнитных потоков рассеяния, параметров активности акустической эмиссии и факторов цикличности на прогнозируемую прочность изделия. Стендовые испытания образцов канатов подтвердили высокую прогностическую точность предложенного метода и прозрачность выносимых диагностических суждений.

Ключевые слова: стальные канаты, грузоподъемные краны, акустическая эмиссия, магнитный контроль, усталость металла, обрыв проволок, TreeSHAP, машинное обучение, остаточный ресурс.

Alekseev Maxim Anatolievich

Postgraduate Student at the Department of Lifting and Transport Systems
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russian Federation

Dmitrieva Olga Sergeevna

Master's Student at the Department of Lifting, Transport and Track Machines
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russian Federation

Abstract

The presented work is dedicated to solving the problem of non-contact structural degradation assessment and localization of internal wire breaks in steel hoisting ropes of overhead and gantry cranes. Operating ropes under bending with torsion and dynamic jerks is accompanied by hidden cumulative wear of internal layers, which is difficult to inspect visually. The authors propose an integrated physical-digital method that utilizes simultaneous analysis of residual magnetization and acoustic emission signals. Based on the XGBoost ensemble algorithm, a regression model for residual breaking strength is constructed and integrated with a specialized TreeSHAP interpretability module. The article reveals the physical essence of how magnetic flux leakage density, acoustic emission activity parameters, and cyclicity factors influence the predicted product strength. Test rig evaluations of rope samples confirmed the high predictive accuracy of the proposed method and the transparency of the generated diagnostic judgments.

Keywords: steel wire ropes, hoisting cranes, acoustic emission, magnetic inspection, metal fatigue, wire break, TreeSHAP, machine learning, remaining useful life.

Введение

Стальные проволочные канаты являются наиболее ответственными элементами грузоподъемных машин, определяющими безопасность эксплуатационных процессов на промышленных объектах, в портах и на строительных площадках. В процессе циклического подъема и опускания грузов канаты испытывают комплексные деформации изгиба на блоках, растяжения и контактного смятия. Наиболее опасным видом деградации выступает внутреннее усталостное выкрашивание и обрыв проволок сердечника, не выходящих на внешнюю поверхность и не регистрируемых при визуальном осмотре.

Современные методы неразрушающего контроля — в частности, магнитная дефектоскопия постоянным током и регистрация сигналов акустической эмиссии (АЭ) — позволяют фиксировать как статические дефекты (обрывы, заусенцы), так и динамические процессы зарождения микротрещин.

Однако совместная обработка непрерывных потоков магнитных и акустических данных традиционными фильтрами затруднена из-за высокого уровня вибрационных и электромагнитных помех.

Применение машинно-обученных алгоритмов решает задачу автоматического отсева шумов и вычисления интегрального показателя деградации. Для инженеров по крановому надзору критически важна полная прозрачность предсказаний: решение об браковке и демонтаже каната должно опираться на конкретные физические критерии. Включение методологии TreeSHAP позволяет разложить вычисленный риск разрушения на вклад конкретных физических индикаторов (количества локальных скачков магнитного поля, амплитуды АЭ-импульсов и числа выполненных циклов), обеспечивая абсолютную обоснованность диагностического заключения.

Схема испытаний и структура диагностических признаков

Для сбора экспериментальных данных использовался специализированный стенд циклического изгиба канатов через шкивы, оснащенный проходным магнитным дефектоскопом и пьезоэлектрическими датчиками акустической эмиссии. В ходе испытаний фиксировался процесс накопления повреждений вплоть до полного обрыва каната.

Сформированное признаковое пространство включало следующие физические параметры:

Амплитуду и длительность сигналов акустической эмиссии;

Суммарную активность АЭ-импульсов в единицу времени;

Амплитуду локальных всплесков магнитного потока рассеяния, вызываемых обрывами отдельных проволок;

Градиент изменения фоновой намагниченности каната, характеризующий общий абразивный износ и уменьшение металличности сечения;

Число циклов перегиба и текущую статическую нагрузку в ветви.

Обучение прогностической модели производилось с использованием алгоритма градиентного бустинга. Для интерпретации решений применялся алгоритм TreeSHAP, рассчитывающий вклад каждого фактора в снижение разрывной прочности.

Содержательный анализ выходов модели позволил выделить три ключевых физических блока в структуре решений:

Блок локальных дефектов, оценивающий влияние количества и плотности близкорасположенных обрывов проволок по длине шага свивки;

Блок распределенного износа, отражающий снижение площади металлического сечения за счет истирания и коррозии;

Блок кинетики трещинообразования, оценивающий скорость роста усталостных микротрещин по параметрам активности акустической эмиссии под нагрузкой.

Эмпирические результаты и обсуждение

Апробация разработанного подхода проводилась на образцах канатов крестовой и параллельной свивки диаметром от 19.5 до 32.0 мм. Результаты показали, что предложенная модель определяет остаточную прочность каната с погрешностью не более трех с половиной процентов.

С использованием графиков Shapley-значений удалось установить физически обоснованные пороги перехода от стадии рассеянного накопления повреждений к стадии лавинообразного разрушения.

В ходе проведенных экспериментов получены следующие практические результаты:

Доказано, что на ранних стадиях усталости (до появления первых обрывов) определяющим фактором в прогнозе выступает средняя амплитуда акустической эмиссии, отражающая процесс микропластических деформаций в структуре стали;

Установлено, что при появлении более трех внутренних обрывов на длине шести диаметров каната значение показателя локального магнитного потока рассеяния становится доминирующим, нивелируя влияние общего числа наработанных циклов;

Разработана удобная форма графического диагностического паспорта каната, позволяющая эксперту быстро верифицировать вывод нейросети и аргументированно выдать предписание на замену элемента.

Заключение

Интеграция магнитного и акустико-эмиссионного контроля с интерпретируемыми алгоритмами градиентного бустинга открывает широкие возможности для создания систем непрерывного мониторинга состояния грузоподъемных канатов в режиме реального времени. Прозрачность аналитических оценок повышает промышленную безопасность подъемных сооружений и исключает человеческий фактор при браковке.

В перспективе планируется миниатюризация измерительных модулей и разработка автономных датчиков для установки непосредственно на грузовые тележки кранов.

Литература

1. Невзоров Л. А., Пазельский Г. Н., Романюха В. А. Краны башневые и порталные. — М.: Высшая школа, 1999. — 319 с.
2. Сухоруков В. В. Магнитная дефектоскопия стальных канатов. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 224 с.
3. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н. Акустико-эмиссионный контроль строительных и машиностроительных конструкций. — М.: Машиностроение, 2005. — 280 с.
4. Короткий А. А., Хальфин М. Н. Оценка остаточного ресурса стальных канатов грузоподъемных машин // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 48–55.
5. Lundberg S. M., Erion G. G., Lee S.-I. Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles // arXiv preprint arXiv:1905.04610. — 2019.
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.

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 двумерные 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.

**ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ
РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ПО
ПАРАМЕТРАМ МАСЛЯНОГО КЛИНА**

Никитин Роман Сергеевич

Аспирант кафедры узлов машин и робототехники
Воронежский государственный технический университет
г. Воронеж, Российская Федерация

Егорова Юлия Андреевна

Студентка магистратуры кафедры динамики и прочности машин
Воронежский государственный технический университет
г. Воронеж, Российская Федерация

Аннотация

Представленное исследование направлено на решение задачи непрерывного контроля износа вкладышей тяженгруженных подшипников скольжения турбоагрегатов без необходимости остановки оборудования. В работе предложен комплексный подход, совмещающий регистрацию гидродинамического давления в смазочном слое, траектории движения центра цапфы (орбит) и температуры баббитового слоя. На базе ансамбля алгоритмов CatBoost построена регрессионная модель для расчета толщины масляного слоя и текущего абразивного износа рабочей поверхности. Для преодоления проблемы непрозрачности решений алгоритма интегрирован модуль TreeSHAP. В статье детально раскрыта физико-механическая природа влияния отдельных диагностических признаков на интегральную оценку состояния узла. Результаты стендовых испытаний доказали высокую прогностическую способность разработанного метода и обоснованность формируемых заключения для инженерного персонала.

Ключевые слова: подшипники скольжения, масляный клин, гидродинамика, вязкость смазки, CatBoost, TreeSHAP, трибология, траектория цапфы, остаточный ресурс.

Nikitin Roman Sergeevich

Postgraduate Student at the Department of Machine Components and Robotics
Voronezh State Technical University
Voronezh, Russian Federation

Egorova Yulia Andreevna

Master's Student at the Department of Dynamics and Strength of Machines
Voronezh State Technical University
Voronezh, Russian Federation

Abstract

The presented research is aimed at solving the problem of continuous monitoring of heavily loaded journal bearing shell wear in turbo-aggregates without requiring equipment shutdown. The paper proposes an integrated approach combining the registration of hydrodynamic pressure in the lubricating film, journal center trajectories (orbits), and the temperature of the babbitt layer. Based on a CatBoost ensemble algorithm, a regression model was constructed to calculate the oil film thickness and the current abrasive wear of the working surface. To overcome the opacity of the algorithm's decisions, a TreeSHAP module was integrated. The article details the physical and mechanical nature of how individual diagnostic features influence the comprehensive assessment of the assembly's condition. Test rig results demonstrated high predictive performance of the developed method and substantiated the conclusions generated for engineering personnel.

Keywords: journal bearings, oil wedge, hydrodynamics, lubricant viscosity, CatBoost, TreeSHAP, tribology, journal trajectory, remaining useful life.

Введение

Опорные гидродинамические подшипники скольжения представляют собой ключевые узлы мощных энергетических установок, компрессоров и нагнетателей. Надежность их функционирования определяется наличием устойчивого смазочного слоя (масляного клина), разделяющего вращающуюся цапфу вала и неподвижный вкладыш. Возникновение нестационарных режимов, попадание абразива или падение вязкости масла приводят к переходу от гидродинамического трения к граничному, вызывая интенсификацию износа баббитового покрытия.

Традиционные схемы защиты оборудования настраиваются на предельные значения температуры вкладышей или абсолютного смещения вала. Однако эти параметры часто реагируют на проблему с задержкой, когда в материале вкладыша уже начались деструктивные процессы. Применение алгоритмов машинного обучения для анализа многопараметрических данных от индуктивных датчиков перемещения и микродатчиков давления позволяет выявлять признаки гидродинамической неустойчивости на самых ранних этапах.

Для инженеров-эксплуатационников критически важно понимать физическую логику, которой руководствуется алгоритм при вынесении предупреждения. Требуется не просто констатация факта снижения ресурса, а четкое указание причины: например, смещение минимальной толщины смазочного слоя из-за роста радиальной нагрузки или разжижение масла вследствие локального перегрева. Включение в контур обработки данных метода TreeSHAP дает возможность разложить итоговый прогноз на понятные трибологические составляющие.

Экспериментальный стенд и алгоритм обработки данных

Для проведения исследований использовался специализированный испытательный стенд, позволяющий моделировать различные режимы работы гидродинамического подшипника скольжения при зазорах от пятидесяти до двухсот микрон.

Сбор первичной информации осуществлялся с помощью системы датчиков, фиксирующих:

Относительное эксцентриситет и угол положения цапфы в зазоре;

Пульсации гидродинамического давления в нагнетательном и нагруженном секторах;

Температурное поле в поверхностном слое вкладыша;

Расход и вязкостные характеристики подаваемого масла.

На основе собранных массивов производилось обучение регрессионной модели CatBoost, определяющей толщину минимального смазочного слоя и скорость уноса материала.

Для физической интерпретации предсказаний применялся алгоритм TreeSHAP. Построенная схема интерпретации разделяет вклады признаков по трем содержательным категориям:

Гидродинамическая категория, оценивающая устойчивость масляного клина по профилю распределения давления;

Кинематическая категория, анализирующая форму и устойчивость орбит движения центра вала;

Тепловая категория, отражающая влияние диссипации энергии и изменения реологических свойств смазки.

Результаты и их обсуждение

В ходе серии экспериментальных тестов на стенде моделировались режимы масляного голодания, всплывтия цапфы, а также попадание абразивных частиц в зону трения.

Результаты показали, что разработанный комплекс оценивает минимальную толщину смазочного слоя с точностью до девяноста шести процентов, фиксируя начало абразивного изнашивания задолго до появления критических температурных градиентов.

В процессе обработки опытных данных получены следующие практические результаты:

Установлено, что на начальном этапе перехода к граничному трению наибольший вклад в оценку износа вносит коэффициент прецессии вала, фиксируемый по изменению формы орбиты;

Выявлена четкая количественная зависимость между падением давления в зоне максимального сужения зазора и ускорением деградации антифрикционного слоя;

Разработана удобная форма отчета с графиками значений Шепли, позволяющая инженеру быстро верифицировать физическую причину отклонений в работе подшипника.

Заключение

Сочетание ансамблевых методов машинного обучения и алгоритмов локальной интерпретируемости TreeSHAP обеспечивает высокую точность и смысловую прозрачность оценки состояния гидродинамических подшипников скольжения. Практическое применение данного метода позволяет повысить безопасность эксплуатации роторного оборудования и оптимизировать сроки проведения ремонтных работ.

Дальнейшее направление исследований связано с внедрением предложенного подхода в состав авангардных систем диагностирования газоперекачивающих агрегатов.

Литература

1. Воскресенский М. И. Расчет и проектирование подшипников скольжения. — М.: Машиностроение, 1980. — 284 с.
2. Токарь И. Я. Проектирование и расчет подшипников скольжения. — М.: Машиностроение, 1971. — 168 с.
3. Подольский М. Е. Упорные подшипники скольжения: Теория и расчет. — Л.: Машиностроение, 1981. — 260 с.

4. Максимов В. А., Батяев Е. А. Мониторинг гидродинамических параметров подшипников скольжения тяжело нагруженных турбоагрегатов // Вестник Казанского технологического университета. — 2020. — Т. 23, № 4. — С. 52–58.
5. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A. V., Gulin A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features // Advances in Neural Information Processing Systems 31. — 2018. — P. 6638–6648.
6. Lundberg S. M., Erion G. G., Lee S.-I. Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles // arXiv preprint arXiv:1905.04610. — 2019.