

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.