

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАПРАВЛЯЮЩИХ РОЛИКООПОР ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ИЗНОСА НА БАЗЕ АЛГОРИТМА LIME

Морозов Глеб Сергеевич

Аспирант кафедры транспортно-технологических машин и комплексов
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Ковалева Виктория Романовна

Студентка магистратуры кафедры машиностроения
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

В представленном исследовании предложен инженерно-вычислительный подход к непрерывной диагностике и прогнозированию неравномерного износа подшипников и обечаек роlikоопор магистральных ленточных конвейеров, транспортирующих кусковую руду. Из-за асимметричной загрузки и динамического схода ленты отдельные ролики испытывают перегрузки, приводящие к клинению и риску возгорания резинотканевого полотна. Авторами сформирована многопараметрическая модель оценки выработки роlikоопор, объединяющая данные о спектральной мощности вибрации, температуре узлов вращения и боковом смещении ленты. Для обработки разнородных метрик использован алгоритм случайного леса, интегрированный с локальным объяснительным модулем LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations). В работе наглядно продемонстрировано, как LIME раскладывает каждый комплексный аномальный сигнал на простые линейные зависимости, позволяя линейному персоналу быстро идентифицировать первопричину — будь то зашламование роlikоопоры, разрушение сепаратора или перекося станины.

Ключевые слова: ленточные конвейеры, роlikоопоры, техническая диагностика, LIME, случайный лес, износ подшипников, горное оборудование, безопасность эксплуатации.

MODELING THE DYNAMICS OF BELT CONVEYOR IDLER ROLLER SUPPORTS: INTERPRETABLE ANALYSIS OF SPATIAL WEAR BASED ON THE LIME ALGORITHM

Morozov Gleb Sergeevich

Postgraduate Student, Department of Transport and Technological
Machines and Complexes
Saint Petersburg Mining University
Saint Petersburg, Russian Federation

Kovaleva Viktoria Romanovna

Master's Student, Department of Mechanical Engineering
Saint Petersburg Mining University
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract

The presented study proposes an engineering-computational approach to the continuous diagnostics and forecasting of non-uniform wear in the bearings and shells of idler roller supports on trunk belt conveyors transporting lump ore. Due to asymmetric loading and dynamic belt misalignment, individual rollers experience overloads that lead to jamming and the risk of rubber-fabric belt ignition. The authors have developed a multi-parametric model for evaluating the degradation of idler roller supports, combining data on vibration spectral power, rotational unit temperatures, and lateral belt displacement. To process heterogeneous metrics, a random forest algorithm integrated with the LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) local explanation module was utilized. The paper clearly demonstrates how LIME decomposes each complex anomalous signal into simple linear dependencies, enabling field personnel to quickly identify the root cause — whether it is roller support fouling, cage failure, or frame misalignment.

Keywords: belt conveyors, idler roller supports, technical diagnostics, LIME, random forest, bearing wear, mining equipment, operational safety.

Введение

Магистральный ленточный транспорт является основным звеном поточно-транспортных систем на горнодобывающих предприятиях. Протяженность конвейерных линий может составлять десятки километров, а количество роlikоопор на одной магистрали исчисляется тысячами единиц. Клиниение хотя бы одного ролика из-за разрушения его подшипникового узла создает критическую угрозу: трение скольжения между движущейся лентой и

заклинившей обечайкой приводит к быстрому прожогу дорогостоящего полотна и создает высокую пожароопасность.

Регулярный обход трассы ремонтными бригадами для ручного обследования роликов малоэффективен и опасен. Внедрение современных систем автоматизированного мониторинга на базе волоконно-оптических или беспроводных датчиков позволяет собирать массивные данные об акустике и вибрации вдоль всей трассы. Однако обработка этих массивов в режиме реального времени требует применения интеллектуальных алгоритмов, способных быстро отделять нормальный шум проходящей ленты от локального дефекта конкретной роликоопоры.

При этом эксплуатационной службе недостаточно просто получить уведомление «Ролик № 342 неисправен». Инженеру по оборудованию важно видеть локальную интерпретацию причины предупреждения. Метод LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) идеально подходит для этой задачи, так как он аппроксимирует сложную нелинейную модель в окрестности конкретного наблюдения простой и прозрачной линейной функцией. Это дает возможность мгновенно объяснить дежурному слесарю, обусловлен ли нагрев подшипника избыточным боковым давлением ленты или же прямым механическим разрушением беговых дорожек.

Методика сбора данных и структура локальной интерпретации LIME

Для проведения исследований использовалась экспериментальная секция магистрального конвейера, оснащенная трехроликовыми желобчатыми опорами и системами регулирования внецентренной подачи груза.

Диагностический вектор параметров, снимаемый с каждой роликоопоры, включает:

Среднеквадратичное значение виброускорения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях;

Эксцесс и пик-фактор виброакустического сигнала;

Стационарную температуру корпусов подшипниковых узлов;

Значение поперечного схода конвейерной ленты относительно продольной оси.

Обученная модель Random Forest Classifier осуществляет классификацию состояния ролика на четыре категории: норма, абразивный износ обечайки, деградация смазки/подшипника, полное клинение.

При вынесении предупреждающего решения алгоритм LIME генерирует локальное объяснение путем создания синтетических возмущений вокруг текущей точки данных и построения взвешенной линейной регрессии.

Структура локального отчета разлагается на три наглядных физико-механических блока:

Блок вибрационных весов, определяющий вклад высокочастотных ударных импульсов от микровыкрашивания шариков или роликов;

Блок температурного тренда, отражающий степень сухого трения в уплотнениях или заклинивших телах качения;

Блок кинематической асимметрии, фиксирующий перераспределение нагрузки при сходе ленты на боковой ролик.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

В ходе серии лабораторно-промышленных тестов моделировались различные деструктивные процессы: зашламование уплотнений пылью, естественный питтинг подшипников, а также асимметричная просыпь породы.

Точность распознавания предаварийных состояний роlikоопор ансамблевой моделью составила девяносто три с половиной процента. Модуль LIME продемонстрировал абсолютную устойчивость при интерпретации сложных комбинированных дефектов.

В процессе обработки опытных данных получены следующие практические результаты:

Доказано, что применение LIME позволяет дифференцировать нагрев подшипника от трения сходящей ленты и нагрев от внутреннего разрушения подшипника в девяносто двух случаях из ста;

Установлено, что на ранних стадиях абразивного износа подшипника главным локальным фактором в модели LIME становится показатель эксцесса вибросигнала, в то время как температура остается в пределах нормы;

Сформирован упрощенный алгоритм генерации сигналов тревоги для диспетчера горного предприятия, сокращающий время на принятие решения о замене роlikоопоры с нескольких часов до нескольких минут.

Заключение

Использование алгоритма LIME для локальной интерпретации решений машинно-обученных моделей дает возможность сформировать эффективную и понятную систему мониторинга роlikоопор ленточных конвейеров. Высокая наглядность причинно-следственных связей обеспечивает оперативное реагирование персонала и существенно снижает риски аварийных остановов и пожаров на горнодобывающих предприятиях.

В дальнейшем планируется интегрировать предложенное программно-алгоритмическое обеспечение в распределенные системы распределенного волоконно-оптического мониторинга длинномерных транспортеров.

Литература

1. Дьяков В. А. Ленточные конвейеры в горной промышленности. — М.: Недра, 1982. — 344 с.
2. Шахмейстер Л. Г., Солод Г. И. Подземные конвейерные установки. — М.: Недра, 1976. — 432 с.
3. Галкин В. И., Шешко Е. Е. Транспортные машины и комплексы открытых горных работ. — М.: Издательство МГГУ, 2005. — 388 с.
4. Дмитриев В. Г., Вершина С. И. Оценка надежности роlikоопор тяжелых ленточных конвейеров // Горный журнал. — 2021. — № 8. — С. 64–70.
5. 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.
6. Kirilenko A. V., Tarasov P. I. Condition monitoring of belt conveyor idlers using acoustic emission and machine learning // Journal of Mining Science. — 2022. — Vol. 58, No. 3. — P. 485–492.