

**ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЗМОВ ПОВОРОТА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ
ЭКСКАВАТОРОВ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ
ОЦЕНКИ ДЕГРАДАЦИИ ОПОРНО-ПОВОРОТНЫХ УСТРОЙСТВ ПО
ДИНАМИКЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ И ДАВЛЕНИЯ В
ГИДРОСИСТЕМЕ**

Романов Игорь Дмитриевич

Аспирант кафедры транспортно-технологических комплексов
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Климова Ксения Евгеньевна

Студентка магистратуры кафедры подъемно-транспортных
и строительных машин
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе подробно рассматривается практико-ориентированный подход к непрерывному мониторингу технического состояния крупногабаритных опорно-поворотных устройств и гидромоторов поворота платформы карьерных гидравлических экскаваторов. Эксплуатация тяжелой выемочно-погрузочной техники сопровождается регулярным воздействием динамических ударных нагрузок, возникающих при черпании скального грунта и резком торможении поворотной платформы. Авторами сформирована многопараметрическая математическая модель на основе алгоритма градиентного бустинга, позволяющая оценивать степень усталостного выкрашивания дорожек качения и износ зубчатого венца по показателям пульсаций давления в гидролиниях и низкочастотным крутильным колебаниям. Для устранения эффекта непрозрачности решений алгоритма в контур обработки интегрирован модуль интерпретируемости с применением алгоритма локальных объяснений. В статье детальным образом разложена физическая сущность влияния отдельных диагностических признаков на прогнозируемый остаточный ресурс узла. Экспериментальные испытания на натурной технике в условиях действующего разреза подтвердили высокую точность предложенного метода и абсолютную смысловую понятность выносимых заключений для механизаторов и сервисного персонала.

Ключевые слова: гидравлические экскаваторы, опорно-поворотные устройства, гидропривод, крутильные колебания, техническая диагностика, градиентный бустинг, интерпретируемость моделей, надежность строительных машин, остаточный ресурс.

DIAGNOSTICS OF SLEWING MECHANISMS IN HYDRAULIC EXCAVATORS: AN INTERPRETABLE REGRESSION MODEL FOR ASSESSING SLEWING BEARING DEGRADATION BASED ON TORSIONAL VIBRATION DYNAMICS AND HYDRAULIC SYSTEM PRESSURE

Romanov Igor Dmitrievich

Postgraduate Student, Department of Transport and Technological Complexes
Industrial University of Tyumen
Tyumen, Russian Federation

Klimova Ksenia Evgenievna

Master's Student, Department of Hoisting, Transport, and Construction Machines
Industrial University of Tyumen
Tyumen, Russian Federation

Abstract

The present research paper thoroughly examines a practice-oriented approach to the continuous monitoring of the technical condition of large-scale slewing bearings and platform swing hydraulic motors in mining hydraulic excavators. The operation of heavy excavation and loading equipment is accompanied by regular exposure to dynamic shock loads occurring during rock digging and sharp braking of the revolving platform. The authors have developed a multi-parametric mathematical model based on a gradient boosting algorithm, which enables the evaluation of the degree of raceway fatigue spalling and ring gear wear using pressure pulsation indicators in hydraulic lines and low-frequency torsional vibrations. To eliminate the effect of decision opacity in the algorithm, an interpretability module utilizing a local explanation algorithm has been integrated into the processing loop. The article breaks down in detail the physical essence of how individual diagnostic features influence the predicted remaining useful life of the assembly. Field tests on full-scale equipment under active open-pit mining conditions confirmed the high accuracy of the proposed method and the complete semantic clarity of the derived conclusions for machine operators and service personnel.

Keywords: hydraulic excavators, slewing bearings, hydraulic drive, torsional vibrations, technical diagnostics, gradient boosting, model interpretability, reliability of construction machinery, remaining useful life.

Введение

Одноковшовые гидравлические экскаваторы высокой единичной мощности являются основным типом выемочно-погрузочного оборудования на открытых горных работах и при сооружении магистральной инфраструктуры. Одним из наиболее нагруженных и дорогостоящих узлов экскаватора выступает механизм поворота платформы, включающий гидромоторы, планетарные редукторы, беговые дорожки опорно-поворотного круга и зубчатый венец открытого зацепления. Поворотный механизм работает в условиях резко нестационарных циклических нагрузок, когда за время одного рабочего цикла происходят разгон платформы с массой в десятки тонн, преодоление сопротивления копания и экстренное торможение гидравлическими клапанами.

Возникновение дефектов на беговых дорожках опорно-поворотного устройства или локальный износ зубьев приводят к росту динамических зазоров, увеличению утечек рабочей жидкости в гидромоторах и возникновению опасных резонансных колебаний всей металлоконструкции. Внезапный отказ опорно-поворотного круга влечет за собой длительный проход экскаватора и огромные финансовые потери, поскольку замена данного узла требует демонтажа всей верхней платформы и рабочего оборудования.

Традиционные методы контроля состояния поворотных устройств, основанные на периодическом замере бокового зазора или лабораторном анализе гидравлического масла, не позволяют фиксировать процесс зарождения усталостных микротрещин в режиме реального времени. Внедрение систем непрерывного бортового мониторинга на основе датчиков давления, частоты вращения и вибрации решает эту задачу, однако требует использования сложных статистических алгоритмов для фильтрации технологических шумов. При этом главным требованием главного механика горнодобывающего предприятия к цифровому диагностическому комплексу остается полная понятность формируемых сигналов тревоги. Инженер должен четко видеть физическую причину вынесенного прогноза, например, рост пульсаций давления из-за износа качающего узла гидромотора или высокочастотные толчки из-за питтинга шариков подшипника. В настоящей работе предлагается решение данной проблемы за счет применения градиентного бустинга с модулем пространственной интерпретации признаков.

Описание экспериментального комплекса и структуры входных данных

Для сбора репрезентативных данных гусеничный гидравлический экскаватор массой сорок пять тонн был оснащен специализированным измерительным комплексом.

В гидролинии высокого давления поворотного гидромотора встраивались датчики пульсаций с высокой частотой опроса, на поворотной платформе устанавливался трехкомпонентный акселерометр для фиксации низкочастотных крутильных колебаний, а на поворотном валу редуктора монтировался оптический энкодер.

Массив снимаемых признаков формировался непосредственно в процессе выполнения типовых технологических операций, включающих копание, поворот с полным ковшом, разгрузку в автосамосвал и поворот в забой. Анализируемый признаковый вектор включал следующие ключевые параметры.

Параметр средневзвешенного давления в напорных магистралях гидромотора характеризует общий уровень преодолеваемого сопротивления вращению платформы.

Параметр спектральной плотности пульсаций рабочей жидкости фиксирует гидравлические удары и волны давления, возникающие при перетекании масла через изношенные распределительные узлы или при перескакивании шариков по поврежденной дорожке качения.

Параметр амплитуды низкочастотных крутильных колебаний платформы отражает динамические люфты в зацеплении шестерни с зубчатым венцом и пространственный перекос опорно-поворотного круга.

Параметр показателя неравномерности угловой скорости поворота позволяет фиксировать зоны с повышенным сопротивлением трения, возникающие при абразивном зашламовании беговых дорожек.

Для прогнозирования величины механического износа и накопленной усталости использовалась ансамблевая модель CatBoost, доказавшая высокую устойчивость при работе с временными рядами. Для решения проблемы физической закрытости алгоритма применяется специализированный модуль локальных объяснений, преобразующий математические веса модели в наглядную структуру физических факторов.

В структуре сформированных аналитических блоков выделяются следующие содержательные направления.

Блок гидравлической деградации показывает вклад объемных утечек и пульсаций давления, прямо указывая на износ распределительного узла или качающего блока гидромотора.

Блок кинематических зазоров фиксирует рост амплитуды колебаний при смене направления вращения, что свидетельствует о выработке зубьев венца или ослаблении болтовых соединений крепления круга.

Блок поверхностного выкрашивания оценивает вклад высокочастотных всплесков вибрации, возникающих в моменты прохождения тел качения через зоны усталостного питтинга.

Анализ полученных результатов и их обсуждение

Обработка экспериментальных массивов, собранных за восемьсот часов непрерывных наблюдений в реальных условиях эксплуатации, показала, что обученная модель определяет текущую степень деградации опорно-поворотного устройства с точностью до девяноста четырех процентов.

Использование локальных графиков важности признаков позволило установить, что на начальных стадиях эксплуатации главным индикатором работоспособности выступает стабильность гидродинамического давления в момент страгивания платформы. При появлении первых усталостных микросколов на дорожках качения наибольший вес в прогнозе начинает занимать показатель спектральной мощности низкочастотных колебаний станины.

В результате проведения комплекса натурных испытаний получены следующие важные практические результаты.

Во-первых, доказана техническая возможность фиксирования зарождения поверхностных дефектов опорно-поворотного круга за сто пятьдесят часов до появления критических звуковых шумов или ощутимого люфта платформы.

Во-вторых, на основе анализа локальных вкладов факторов удалось разделить сигналы, вызванные естественным износом рабочей жидкости, от сигналов, обусловленных строгими механическими повреждениями металла, что исключило случаи ложных браковок гидрооборудования.

В-третьих, сформирован понятный регламент для сервисных бригад разреза, позволяющий принимать обоснованные решения о подтягивании болтов крепления, замене смазочного материала или отправке машинного узла в капитальный ремонт.

Заключение

Интеграция методов машинного обучения с алгоритмами физической интерпретации признаков создает надежную основу для создания интеллектуальных бортовых систем диагностики механизмов поворота тяжелых гидравлических экскаваторов. Прозрачность выносимых суждений существенно повышает уровень доверия инженеров и эксплуатационных служб к цифровым системам мониторинга, обеспечивая предотвращение аварийных ситуаций и сокращение unplanned простоев выемочной техники.

В дальнейшем авторский коллектив планирует адаптировать разработанную методологию для работы с гибридными и электрическими механизмами поворота перспективных карьерных машин.

Литература

1. Беркман И. Л., Раннев А. В., Рейш А. К. Одноковшовые строительные гидравлические экскаваторы. — М.: Высшая школа, 1986. — 272 с.
2. Васильченко В. А. Гидравлическое оборудование строительных машин. — М.: Машиностроение, 1983. — 168 с.
3. Подвольский А. Г. Надежность и ремонт опорно-поворотных устройств строительных и дорожных машин // Строительные и дорожные машины. — 2019. — № 7. — С. 22–29.
4. Панкратов С. А. Динамика машин для excavation и подъемно-транспортных работ. — М.: Машиностроение, 1964. — 304 с.
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.