

**ПРЕДИКТИВНАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
ПЛАНЕТАРНЫХ РЕДУКТОРОВ ТЯЖЕЛЫХ МОБИЛЬНЫХ МАШИН:
ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ РЕГРЕССИЯ ДЕГРАДАЦИИ СМАЗОЧНОГО
МАТЕРИАЛА И ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА**

Васильев Олег Игоревич

Аспирант кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства
Сибирский автомобильно-дорожный университет
г. Омск, Российская Федерация

Мухина Екатерина Андреевна

Студентка магистратуры кафедры подъемно-транспортных,
тяговых и дорожных машин
Сибирский автомобильно-дорожный университет
г. Омск, Российская Федерация

Аннотация

В представленной статье рассматривается комплексный подход к непрерывному мониторингу работоспособности планетарных колесных редукторов тяжелых карьерных самосвалов и сочлененных самосвалов. Высокие нагрузки в компактном объеме корпуса при ограниченном масляном картере приводят к скоростному термическому окислению трансмиссионного масла и последующему ускоренному износу сателлитов и солнечных шестерен. Авторами разработана регрессионная модель на основе алгоритма экстремального градиентного бустинга, оценивающая динамику деградации смазочного материала и интенсивность металлизации масла по массиву данных от погружных датчиков диэлектрической проницаемости, температуры и кинематической вязкости. Для детального объяснения предсказаний модели внедрен инструмент локальных атрибуций TreeSHAP. В работе раскрыта физическая взаимосвязь между накоплением продуктов окисления, выпадением присадок в осадок и ростом поверхностного износа зубчатых венцов. Натурные испытания на карьерных автосамосвалах подтвердили высокую надежность разработанного цифрового комплекса.

Ключевые слова: планетарные редукторы, карьерные самосвалы, трансмиссионное масло, диэлектрическая проницаемость, градиентный бустинг, TreeSHAP, предиктивная диагностика, остаточный ресурс, трибология.

PREDICTIVE ASSESSMENT OF REMAINING USEFUL LIFE IN PLANETARY GEARBOXES OF HEAVY MOBILE MACHINERY: INTERPRETABLE REGRESSION OF LUBRICANT DEGRADATION AND THERMAL REGIME

Vasilyev Oleg Igorevich

Postgraduate Student, Department of Automobiles and Automotive Industry
Siberian State Automobile and Highway University
Omsk, Russian Federation

Mukhina Ekaterina Andreevna

Master's Student, Department of Hoisting, Transport, Traction, and Road Machines
Siberian State Automobile and Highway University
Omsk, Russian Federation

Abstract

The present article examines an integrated approach to the continuous condition monitoring of planetary wheel gearboxes in heavy mining dump trucks and articulated haulers. High loads acting within a compact housing volume under limited oil sump capacity lead to rapid thermal oxidation of gear oil and subsequent accelerated wear of planet gears and sun gears. The authors have developed a regression model based on the extreme gradient boosting algorithm, which evaluates lubricant degradation dynamics and oil metallization rate using a data array from submerged sensors measuring permittivity, temperature, and kinematic viscosity. To provide a detailed explanation of model predictions, the TreeSHAP local attribution tool has been integrated. The paper reveals the physical relationship between the accumulation of oxidation products, additive precipitation, and the growth of gear tooth surface wear. Full-scale field tests on mining dump trucks confirmed the high reliability of the developed digital system.

Keywords: planetary gearboxes, mining dump trucks, gear oil, permittivity, gradient boosting, TreeSHAP, predictive diagnostics, remaining useful life, tribology.

Введение

Планетарные колесные редукторы карьерных автосамосвалов высокой грузоподъемности функционируют в предельно жестких условиях. Габаритно-массовые ограничения ступицы колеса заставляют конструкторов передавать огромные крутящие моменты через компактные зубчатые зацепления при крайне ограниченном объеме смазочного материала.

В процессе движения по затяжным технологическим уклонам температура смазки внутри закрытого корпуса редуктора может достигать ста сорока градусов, что приводит к термоокислительной деструкции базового масла и выгоранию противозадирных присадок.

Снижение несущей способности масляной пленки вызывает переход от гидродинамического контакта к граничному с интенсивным выделением тепла и уносом металла с рабочих поверхностей сателлитов. Традиционная замена трансмиссионных масел по жесткому временному регламенту не учитывает индивидуальную тяжесть условий эксплуатации конкретной машины. В одном случае масло теряет свойства задолго до планового обслуживания, приводя к задиру и заклиниванию редуктора, в другом — сливается вполне работоспособный продукт, что увеличивает эксплуатационные расходы.

Решением проблемы является переход к обслуживанию по фактическому состоянию на основе непрерывного анализа параметров масла встроенными датчиками. Однако многофакторность процессов окисления и механического загрязнения смазки затрудняет построение прямых физико-математических зависимостей. Применение алгоритмов машинного обучения позволяет точно прогнозировать остаточный ресурс, а использование модуля TreeSHAP дает инженерно-техническому персоналу детальную физическую карту причин сработки масла и накопления продуктов износа.

Методика эксперимента и структура входных параметров

Для проведения исследований ступичные планетарные редукторы карьерного автосамосвала грузоподъемностью сто тридцать тонн оснащались мультипараметрическими датчиками, встроенными в сливные пробки и крышки редукторов.

Система в режиме реального времени фиксировала следующий комплекс диагностических показателей.

Показатель относительно-диэлектрической проницаемости смазочного материала отражает суммарное накопление полярных продуктов окисления, а также наличие обводнения или сажевого загрязнения.

Показатель динамической и кинематической вязкости при текущей рабочей температуре позволяет фиксировать момент деструкции полимерного загустителя или, напротив, смолообразование и густение смазки.

Показатель градиента роста температуры смазки в нагруженном режиме характеризует фрикционные потери в зубчатых зацеплениях и подшипниках качения сателлитов.

Параметр суммарной наработки под нагрузкой и выполненной транспортной работы в тонно-километрах используется в качестве базовой временной шкалы.

На основе указанного признакового пространства обучена регрессионная модель XGBoost, прогнозирующая толщину минимального смазочного слоя и массу смываемого металла. Для разъяснения логики алгоритма применяется декомпозиция Shapley-значений.

Физическая интерпретация выходных данных разделена по трем ключевым содержательным категориям.

Категория термоокислительной деградации оценивает вклад высокотемпературного воздействия на разрушение химической структуры смазки.

Категория механического загрязнения выделяет рост диэлектрической проницаемости, обусловленный появлением мелкодисперсной металлической взвеси от питтинга зубьев.

Категория реологического запаса фиксирует критическое падение вязкости, угрожающее прямым металлическим контактом трущихся поверхностей.

Анализ экспериментальных результатов

Экспериментальная апробация проводилась на базе действующего угольного разреза в течение двенадцати месяцев при температурах окружающего воздуха от минус сорока до плюс тридцати пяти градусов.

Разработанная регрессионная модель продемонстрировала способность прогнозировать критическую потерю смазочных свойств масла и начало интенсивного изнашивания с точностью до девяноста пяти и двух десятых процента.

В ходе обработки натурных данных получены следующие важные практические результаты.

Во-первых, доказано, что критическим фактором, определяющим ускоренный износ планетарных передач в летний период, выступает не средняя температура масла, а длительность работы в диапазоне свыше ста двадцати градусов, при которой ускоряется деструкция противозадирных добавок.

Во-вторых, на основе анализа значений Shapley удалось четко разделить моменты, когда рост диэлектрической проницаемости вызван попаданием влаги, от случаев реальной металлизации масла при усталостном выкрашивании сателлитов.

В-третьих, сформирована практическая карта принятия решений для механиков автоколонны, позволяющая аргументированно продлевать интервал замены масла на двадцать-тридцать процентов при легких условиях эксплуатации или заблаговременно направлять машина на заправку при аномально высокой скорости окисления.

Заключение

Внедрение интерпретируемого машинного обучения в системы бортовой трибодиагностики планетарных редукторов тяжелых автосамосвалов обеспечивает высокую точность прогнозирования остаточного ресурса смазки и узлов трения. Прозрачность физических аргументов модели устраняет неопределенность при принятии решений и существенно снижает риски внезапных поломок трансмиссии в рейсе.

В перспективе планируется объединить данные бортовых масляных датчиков с системами спутникового мониторинга для автоматического учета профиля трассы при расчете износа.

Литература

1. Тарабасов Н. Д., Лехов Г. И. Проектирование планетарных передач. — М.: Машиностроение, 1974. — 256 с.
2. Кузнецов Е. С. Техническая эксплуатация автомобилей. — М.: Транспорт, 2001. — 535 с.
3. Григорьев М. А., Бунаков Б. М. Качество моторных и трансмиссионных масел и надежность двигателей. — М.: Издательство стандартов, 1984. — 232 с.
4. Маринич Л. А., Балицкий В. И. Оценка технического состояния колесных редукторов карьерных автосамосвалов // Горное оборудование и электромеханика. — 2020. — № 3. — С. 41–47.
5. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. — 2016. — P. 785–794.
6. Lundberg S. M., Erion G. G., Lee S.-I. Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles // arXiv preprint arXiv:1905.04610. — 2019.