

ДИАГНОСТИКА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСМИССИЙ ТЯЖЕЛЫХ БУЛЬДОЗЕРОВ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ИЗНОСА ФРИКЦИОННЫХ ДИСКОВ ПО ДИНАМИКЕ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОМУ ПРОФИЛЮ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

Смирнов Артем Сергеевич

Аспирант кафедры транспортных и технологических систем
Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Мельникова Полина Андреевна

Студентка магистратуры кафедры подъемно-транспортных и строительных
машин

Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленной статье рассматривается научно обоснованный подход к непрерывной оценке технического состояния фрикционных муфт гидромеханических передач гусеничных бульдозЕРОВ тяжелого класса. Регулярное реверсирование движения, внедрение отвала в плотный грунт и работа в условиях отрицательных температур вызывают повышенное буксование фрикционных дисков, коробление стальных пластин и износ накладок. Авторами сформирована регрессионная модель на основе алгоритма случайного леса, позволяющая рассчитывать степень износа фрикционных элементов по временным характеристикам нарастания давления в бустерах, длительности фазы буксования и пиковым значениям температуры масла. Для устранения неопределенности в выносимых алгоритмом решениях применен модуль локальных объяснений на основе Shapley-значений. В работе подробно раскрыта физическая сущность влияния отдельных диагностических параметров на износ фрикционного материала. Полевые испытания на карьерной строительной технике подтвердили высокую точность и наглядность предложенной методики.

Ключевые слова: тяжелые бульдозеры, гидромеханическая трансмиссия, фрикционные муфты, износ дисков, случайный лес, Shapley-значения, предиктивная диагностика, остаточный ресурс, переключение передач.

DIAGNOSTICS OF HYDROMECHANICAL TRANSMISSIONS IN HEAVY BULLDOZERS: AN INTERPRETABLE MODEL FOR EVALUATING FRICTION DISC WEAR BASED ON PRESSURE DYNAMICS AND SHIFTING TEMPERATURE PROFILE

Smirnov Artem Sergeevich

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

Melnikova Polina Andreevna

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

Abstract

The present article considers a scientifically grounded approach to the continuous evaluation of the technical condition of friction clutches in hydromechanical transmissions of heavy crawler bulldozers. Regular motion reversal, blade penetration into dense soil, and operation under sub-zero temperatures induce increased friction disc slippage, steel plate warping, and lining wear. The authors have developed a regression model based on the random forest algorithm, which allows calculating the degree of friction element wear using temporal parameters of booster pressure buildup, slippage phase duration, and peak oil temperature values. To eliminate uncertainty in the decisions issued by the algorithm, a local explanation module based on Shapley values was applied. The paper reveals in detail the physical essence of how individual diagnostic parameters influence friction material wear. Field tests on mining construction equipment confirmed the high accuracy and visual clarity of the proposed methodology.

Keywords: heavy bulldozers, hydromechanical transmission, friction clutches, disc wear, random forest, Shapley values, predictive diagnostics, remaining useful life, gear shifting.

Введение

Промышленные гусеничные бульдозеры массой от тридцати до шестидесяти тонн выполняют основной объем тяжелых земляных и вскрышных работ при разработке полезных ископаемых и строительстве инфраструктурных объектов. Надежность работы этих машин во многом определяется состоянием гидромеханической трансмиссии, передающей крутящий момент от дизельного двигателя к бортовым редукторам. Ключевым и наиболее уязвимым элементом планетарных коробок передач выступают многодисковые фрикционные муфты, работающие в масле.

Регулярные переключения ступеней под нагрузкой, постоянное реверсирование хода при разработке забоя и случайные соударения отвала с непреодолимыми препятствиями приводят к длительному буксованию фрикционных фрикционов. В процессе буксования происходят интенсивное выделение тепла, деструкция фрикционных накладок и термическое коробление стальных ведомых дисков. Накопление износа проявляется в увеличении времени включения передачи, снижении передаваемого момента и, в конечном счете, к полному буксованию муфты с задиром фрикционных поверхностей.

Традиционные методы обслуживания трансмиссий по фиксированной наработке в моточасах не способны учитывать индивидуальную жесткость режимов работы различных машинистов. В то же время прямое измерение толщины фрикционных накладок требует полной разборки коробки передач и длительного простоя техники. Внедрение бортовых систем непрерывной диагностики на основе высокочастотных датчиков давления в бустерах и датчиков частоты вращения валов позволяет фиксировать параметры каждого переключения. Применение алгоритмов машинного обучения с модулями физической интерпретации признаков дает возможность инженерам сервисных служб точно знать степень деградации каждой муфты без вскрытия агрегата.

Методика экспериментальных исследований и признаковое пространство

Для сбора диагностической информации бульдозер тяжелого класса был оснащен измерительным комплексом. Датчики давления с быстрой реакцией устанавливались в магистралях питания бустеров всех фрикционных муфт, индуктивные датчики частоты вращения монтировались на входном и выходном валах коробки передач, а погружные термодатчики размещались в зонах слива масла из фрикционных блоков.

Измерения выполнялись непосредственно в ходе выполнения нормативных технологических операций, включая зарезание отвала, транспортировку грунта, реверсирование и разворот на месте. В качестве основных диагностических признаков выделены следующие параметры.

Параметр длительности фазы буксования фрикциона определяет временной интервал от начала роста давления в бустере до полного выравнивания угловых скоростей ведущих и ведомых дисков.

Параметр скорости нарастания давления в бустере характеризует работоспособность клапанов плавности и степень зашламования подводящих каналов.

Параметр абсолютного температурного скачка масла за одно переключение отражает количество выделенной в процессе трения энергии и качество охлаждения фрикционного пакета.

Параметр величины остаточного давления в выключенном бустере позволяет выявлять коробление дисков и их неполное размыкание, приводящее к постоянному подгоранию накладок.

На основе указанного признакового набора обучена ансамблевая модель случайного леса, прогнозирующая суммарную выработку фрикционного материала. Модуль интерпретации преобразует математические веса модели в наглядную структуру физических факторов.

Результаты диагностики систематизируются по следующим смысловым направлениям.

Направление фрикционного износа показывает вклад увеличения длительности буксования, прямо свидетельствуя о снижении коэффициента трения и уменьшении толщины накладок.

Направление термической деградации выделяет случаи работы при повышенных температурах, вызывающих спекание фрикционного слоя и потери его пористости.

Направление гидродинамических нарушений оценивает влияние замедленного срабатывания клапанов распределителя на ускорение износа.

Анализ результатов и практические выводы

Обработка массива данных, полученных за девятьсот часов эксплуатации бульдозера в условиях отрицательных и положительных температур окружающей среды, показала высокий уровень точности оценки состояния фрикционных муфт. Модель определила величину износа дисков с погрешностью, не превышающей пяти с половиной процентов.

Анализ локальных атрибуций признаков показал, что наиболее информативным показателем начальной стадии износа является увеличение длительности фазы буксования при низких температурах трансмиссионного масла. При сильном износе накладок преобладающим фактором становится резкий температурный скачок в момент включения передачи под высокой нагрузкой.

В ходе проведенных исследований получены следующие результаты.

Во-первых, доказана возможность обнаружения предельного износа фрикционных дисков за двести часов до наступления аварийного буксования и разрушения коробки передач.

Во-вторых, на основе декомпозиции факторов удалось разграничить проблемы, вызванные механическим износом накладок, от проблем, обусловленных зависанием золотников гидравлического блока управления.

В-третьих, разработан четкий диагностический протокол для механиков строительного участка, позволяющий планировать замену фрикционных пакетов во время плановых ремонтов без остановки технологического процесса.

Заключение

Применение алгоритмов машинного обучения с понятной физической интерпретацией входных параметров позволяет создать эффективную систему предиктивной диагностики гидромеханических трансмиссий тяжелых бульдозеров. Высокая прозрачность формируемых выводов гарантирует своевременность технического обслуживания, исключает риск внезапных аварий и продлевает общий срок службы гидромеханических передач.

В дальнейшем планируется расширить разработанный подход для анализа состояния гидротрансформатора и бортовых фрикционных поворота.

Литература

1. Анохин В. И. Отечественные автомобили и тракторы. — М.: Машиностроение, 1977. — 592 с.
2. Львовский К. Я., Черпак Ф. А. Трансмиссии тяжелых гусеничных машин. — М.: Машиностроение, 1981. — 280 с.
3. Барский И. Б. Конструирование и расчет тракторов. — М.: Машиностроение, 1980. — 336 с.
4. Кравченко И. Н., Пучин Е. А. Надежность и ремонт гидроприводов строительных и дорожных машин // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2018. — № 5. — С. 14–20.
5. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. — 2001. — Vol. 45, No. 1. — P. 5–32.
6. Lundberg S. M., Erion G. G., Lee S.-I. Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles // arXiv preprint arXiv:1905.04610. — 2019.