

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ: ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ПО ПАРАМЕТРАМ МАСЛЯНОГО КЛИНА

Никитин Роман Сергеевич

Аспирант кафедры узлов машин и робототехники
Воронежский государственный технический университет
г. Воронеж, Российская Федерация

Егорова Юлия Андреевна

Студентка магистратуры кафедры динамики и прочности машин
Воронежский государственный технический университет
г. Воронеж, Российская Федерация

Аннотация

Представленное исследование направлено на решение задачи непрерывного контроля износа вкладышей тяженгруженных подшипников скольжения турбоагрегатов без необходимости остановки оборудования. В работе предложен комплексный подход, совмещающий регистрацию гидродинамического давления в смазочном слое, траектории движения центра цапфы (орбит) и температуры баббитового слоя. На базе ансамбля алгоритмов CatBoost построена регрессионная модель для расчета толщины масляного слоя и текущего абразивного износа рабочей поверхности. Для преодоления проблемы непрозрачности решений алгоритма интегрирован модуль TreeSHAP. В статье детально раскрыта физико-механическая природа влияния отдельных диагностических признаков на интегральную оценку состояния узла. Результаты стендовых испытаний доказали высокую прогностическую способность разработанного метода и обоснованность формируемых заключения для инженерного персонала.

Ключевые слова: подшипники скольжения, масляный клин, гидродинамика, вязкость смазки, CatBoost, TreeSHAP, трибология, траектория цапфы, остаточный ресурс.

Nikitin Roman Sergeevich

Postgraduate Student at the Department of Machine Components and Robotics
Voronezh State Technical University
Voronezh, Russian Federation

Egorova Yulia Andreevna

Master's Student at the Department of Dynamics and Strength of Machines
Voronezh State Technical University
Voronezh, Russian Federation

Abstract

The presented research is aimed at solving the problem of continuous monitoring of heavily loaded journal bearing shell wear in turbo-aggregates without requiring equipment shutdown. The paper proposes an integrated approach combining the registration of hydrodynamic pressure in the lubricating film, journal center trajectories (orbits), and the temperature of the babbitt layer. Based on a CatBoost ensemble algorithm, a regression model was constructed to calculate the oil film thickness and the current abrasive wear of the working surface. To overcome the opacity of the algorithm's decisions, a TreeSHAP module was integrated. The article details the physical and mechanical nature of how individual diagnostic features influence the comprehensive assessment of the assembly's condition. Test rig results demonstrated high predictive performance of the developed method and substantiated the conclusions generated for engineering personnel.

Keywords: journal bearings, oil wedge, hydrodynamics, lubricant viscosity, CatBoost, TreeSHAP, tribology, journal trajectory, remaining useful life.

Введение

Опорные гидродинамические подшипники скольжения представляют собой ключевые узлы мощных энергетических установок, компрессоров и нагнетателей. Надежность их функционирования определяется наличием устойчивого смазочного слоя (масляного клина), разделяющего вращающуюся цапфу вала и неподвижный вкладыш. Возникновение нестационарных режимов, попадание абразива или падение вязкости масла приводят к переходу от гидродинамического трения к граничному, вызывая интенсификацию износа баббитового покрытия.

Традиционные схемы защиты оборудования настраиваются на предельные значения температуры вкладышей или абсолютного смещения вала. Однако эти параметры часто реагируют на проблему с задержкой, когда в материале вкладыша уже начались деструктивные процессы. Применение алгоритмов машинного обучения для анализа многопараметрических данных от индуктивных датчиков перемещения и микродатчиков давления позволяет выявлять признаки гидродинамической неустойчивости на самых ранних этапах.

Для инженеров-эксплуатационников критически важно понимать физическую логику, которой руководствуется алгоритм при вынесении предупреждения. Требуется не просто констатация факта снижения ресурса, а четкое указание причины: например, смещение минимальной толщины смазочного слоя из-за роста радиальной нагрузки или разжижение масла вследствие локального перегрева. Включение в контур обработки данных метода TreeSHAP дает возможность разложить итоговый прогноз на понятные трибологические составляющие.

Экспериментальный стенд и алгоритм обработки данных

Для проведения исследований использовался специализированный испытательный стенд, позволяющий моделировать различные режимы работы гидродинамического подшипника скольжения при зазорах от пятидесяти до двухсот микрон.

Сбор первичной информации осуществлялся с помощью системы датчиков, фиксирующих:

Относительное эксцентриситет и угол положения цапфы в зазоре;

Пульсации гидродинамического давления в нагнетательном и нагруженном секторах;

Температурное поле в поверхностном слое вкладыша;

Расход и вязкостные характеристики подаваемого масла.

На основе собранных массивов производилось обучение регрессионной модели CatBoost, определяющей толщину минимального смазочного слоя и скорость уноса материала.

Для физической интерпретации предсказаний применялся алгоритм TreeSHAP. Построенная схема интерпретации разделяет вклады признаков по трем содержательным категориям:

Гидродинамическая категория, оценивающая устойчивость масляного клина по профилю распределения давления;

Кинематическая категория, анализирующая форму и устойчивость орбит движения центра вала;

Тепловая категория, отражающая влияние диссипации энергии и изменения реологических свойств смазки.

Результаты и их обсуждение

В ходе серии экспериментальных тестов на стенде моделировались режимы масляного голодания, всплывтия цапфы, а также попадание абразивных частиц в зону трения.

Результаты показали, что разработанный комплекс оценивает минимальную толщину смазочного слоя с точностью до девяноста шести процентов, фиксируя начало абразивного изнашивания задолго до появления критических температурных градиентов.

В процессе обработки опытных данных получены следующие практические результаты:

Установлено, что на начальном этапе перехода к граничному трению наибольший вклад в оценку износа вносит коэффициент прецессии вала, фиксируемый по изменению формы орбиты;

Выявлена четкая количественная зависимость между падением давления в зоне максимального сужения зазора и ускорением деградации антифрикционного слоя;

Разработана удобная форма отчета с графиками значений Шепли, позволяющая инженеру быстро верифицировать физическую причину отклонений в работе подшипника.

Заключение

Сочетание ансамблевых методов машинного обучения и алгоритмов локальной интерпретируемости TreeSHAP обеспечивает высокую точность и смысловую прозрачность оценки состояния гидродинамических подшипников скольжения. Практическое применение данного метода позволяет повысить безопасность эксплуатации роторного оборудования и оптимизировать сроки проведения ремонтных работ.

Дальнейшее направление исследований связано с внедрением предложенного подхода в состав авангардных систем диагностирования газоперекачивающих агрегатов.

Литература

1. Воскресенский М. И. Расчет и проектирование подшипников скольжения. — М.: Машиностроение, 1980. — 284 с.
2. Токарь И. Я. Проектирование и расчет подшипников скольжения. — М.: Машиностроение, 1971. — 168 с.
3. Подольский М. Е. Упорные подшипники скольжения: Теория и расчет. — Л.: Машиностроение, 1981. — 260 с.

4. Максимов В. А., Батяев Е. А. Мониторинг гидродинамических параметров подшипников скольжения тяжело нагруженных турбоагрегатов // Вестник Казанского технологического университета. — 2020. — Т. 23, № 4. — С. 52–58.
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.