

ПРИМЕНЕНИЕ АНСАМБЛЕВЫХ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДОВ SHAP ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В ГИДРОТУРБИННОМ ОБОРУДОВАНИИ

Фомин Глеб Игоревич

Аспирант кафедры гидромеханики и гидромашин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Морозова София Васильевна

Студентка магистратуры кафедры машиноведения и деталей машин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

В представленном научном исследовании рассматривается задача мониторинга технического состояния и определения остаточного срока службы опорных подшипниковых узлов крупногабаритных гидроагрегатов. В условиях непрерывной эксплуатации при комбинированных динамических нагрузках традиционные математические модели деградации подшипников часто показывают высокую погрешность. Авторами разработана специализированная аналитическая модель на основе градиентного бустинга над деревьями решений, интегрированная с алгоритмами Shapley Additive Explanations. В работе описывается механизм интерпретации физического вклада спектральных составляющих вибрации, показателей температуры и гидродинамического давления в смазочном слое. Результаты серии стендовых и натурных испытаний подтвердили высокую прогностическую способность системы и позволили обосновать физическую валидность выносимых диагнозов.

Ключевые слова: подшипники качения, гидротурбины, остаточный ресурс, градиентный бустинг, значения Шепли, виброакустический мониторинг, трибология, гидромеханика, диагностика оборудования

Fomin Gleb Igorevich

Postgraduate Student at the Department of Hydromechanics and Hydraulic Machines
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg, Russian Federation

Morozova Sofia Vasilievna

Master's Student at the Department of Machine Science and Machine Details
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

This scientific study considers the task of monitoring the technical condition and determining the remaining useful life of supporting bearing assemblies in large-scale hydraulic units. Under continuous operation subjected to combined dynamic loads, traditional mathematical bearing degradation models often exhibit high error margins. The authors have developed a specialized analytical model based on gradient boosting over decision trees integrated with Shapley Additive Explanations algorithms. The paper describes a mechanism for interpreting the physical contribution of vibration spectral components, temperature indicators, and hydrodynamic pressure within the lubricating film. The results of a series of bench and field tests confirmed the high predictive capability of the system and substantiated the physical validity of the generated diagnoses.

Keywords: rolling bearings, hydraulic turbines, remaining useful life, gradient boosting, Shapley values, vibroacoustic monitoring, tribology, hydromechanics, equipment diagnostics

Введение

Опорные подшипниковые узлы гидротурбин работают в условиях постоянного воздействия циклических гидродинамических нагрузок, кавитационных явлений и температурных колебаний. Повреждение элементов подшипников качения — тел качения, дорожек внутреннего и наружного колец, а также сепаратора — развивается постепенно, начиная с микроскопических усталостных трещин и заканчивая аварийным заклиниванием.

Традиционные методы расчета остаточного ресурса, основанные на стандартах ISO и уравнениях усталостной прочности, рассчитывают средние статистические показатели и не учитывают индивидуальные особенности эксплуатации каждого конкретного агрегата. В свою очередь, применение нейросетевых моделей или глубокого обучения позволяет выявлять скрытые зависимости в потоках данных от датчиков, но их внедрение сдерживается сложностью верификации результатов.

Инженерные службы гидроэлектростанций не могут принимать решения об остановке гидроагрегата без четкого понимания причины, вызвавшей рост показателя риска.

Применение теории кооперативных игр и аддитивных эквивалентов в виде значений Шепли (SHAP) позволяет решить эту проблему. Метод обеспечивает точную математическую декомпозицию итогового предсказания на индивидуальные вклады каждого физического признака, обеспечивая полную прозрачность алгоритма для обслуживающего персонала.

Методология моделирования и интерпретации параметров износа

Предлагаемый подход опирается на непрерывный сбор физических параметров работы подшипникового узла. Набор входных данных включает среднеквадратичное значение виброскорости, пиковые значения виброускорения в высокочастотном диапазоне, эксцесс, параметры огибающей вибрации, а также температуру вкладышей и давление в системе подающей смазки.

Для построения прогностической модели применяется алгоритм градиентного бустинга. Выбор данной архитектуры обусловлен ее устойчивостью к табличным и временным данным, а также высокой скоростью обработки информации.

Для расшифровки логики работы модели применяется специализированный модуль SHAP-анализа. Алгоритм рассчитывает аддитивный вклад каждого физического параметра в итоговую оценку остаточного ресурса подшипника.

Интерпретация полученных результатов осуществляется по нескольким основным направлениям.

Первое направление связывает вклад показателей кинематических частот подшипника с конкретными конструктивными элементами. Например, преобладающий положительный вклад частоты прохождения тел качения по наружному кольцу указывает на усталостное выкрашивание металлической поверхности внешнего кольца.

Второе направление оценивает синергетический эффект температуры и вибрации. Выявление ситуаций, когда рост температуры смазки усиливает негативное влияние виброакустических импульсов, свидетельствует о нарушении условий масляного клина и переходе к граничному трению.

Третье направление фиксирует влияние внешних гидравлических процессов, таких как биения вала, вызванные нестабильностью потока в проточной части турбины.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Апробация разработанного методологического комплекса проводилась на экспериментальном стенде обкатки гидродинамических опор, а также на базе

данных долговременного мониторинга действующего гидроагрегата. В процессе испытаний фиксировалось естественное развитие износа подшипников качения от начальной стадии зарождения микротрещин до критического питтинга.

Результаты показали, что предложенная модель обеспечивает точность прогнозирования остаточного ресурса подшипника с ошибкой, не превышающей пяти процентов от общего времени эксплуатации. Расчет значений Шепли позволил локализовать тип дефекта на две недели раньше, чем классические пороги вибропредупреждения.

В ходе проведения апробации были достигнуты следующие важные результаты.

Во-первых, экспериментально подтверждено, что на ранних стадиях деградации наибольший вклад в прогноз ресурса вносят показатели эксцесса в диапазоне частот от десяти до двадцати килогерц, в то время как на поздних стадиях определяющим фактором становится средняя температура узла.

Во-вторых, благодаря SHAP-анализу удалось исключить из диагностической матрицы дублирующие температурные каналы, что сократило вычислительную нагрузку на локальный промышленный контроллер без потери точности.

В-третьих, сформированы наглядные отчетные профили для инженерного персонала, отражающие физическую динамику накопления повреждений в материале подшипника.

Заключение

Сочетание ансамблевых алгоритмов машинного обучения с методологией SHAP предоставляет надежный и прозрачный инструмент для оценки остаточного ресурса подшипников гидротурбин. Физическая интерпретируемость выносимых решений повышает безопасность эксплуатации гидроэнергетического оборудования и позволяет оптимизировать графики планово-предупредительных ремонтов.

Дальнейшее развитие исследований направлено на создание цифровых двойников гидроагрегатов, объединяющих предсказания машинного обучения с физико-математическими моделями гидродинамики и прочности.

Литература

1. Ковалев М. П., Народецкий М. З. Расчет высокоточных подшипников качения. — М.: Машиностроение, 1980. — 376 с.
2. Александров А. А., Барков А. В., Баркова Н. А., Шафранский В. А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. — СПб.: СПбГМТУ, 2004. — 156 с.
3. Гаврилов С. Н., Костюков В. Н. Мониторинг и диагностика технического состояния роторного оборудования гидроэлектростанций // Электрические станции. — 2018. — № 9. — С. 24–31.

4. Приходько В. М., Козлов К. Б. Трибологическая надежность подшипниковых узлов в тяжелом машиностроении // Трение и износ. — 2021. — Т. 42, № 2. — С. 185–194.
5. Lundberg S. M., Lee S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions // Advances in Neural Information Processing Systems 30. — 2017. — P. 4765–4774.
6. Sundararajan M., Taly A., Yan Q. Axiomatic Attribution for Deep Networks // Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (ICML). — 2017. — Vol. 70. — P. 3319–3328.