

Нейросети учатся распознавать износ подшипников по физически значимым признакам



Внезапный отказ подшипника может остановить производственную линию или нарушить работу ветроустановки. Чтобы планировать обслуживание заранее, инженерам нужен прогноз оставшегося ресурса. Нейросети помогают решать эту задачу, но при изменении скорости вращения и нагрузки их точность может падать. Для промышленности важно не только получить прогноз, но и понять, на какие признаки износа опирается алгоритм.

Исследователи Высшей школы управления кибер-физическими системами СПбПУ доцент *Елена Гебель* и студентка *Турайя Шахин* изучили, как архитектура нейросети и обработка вибрационных сигналов влияют на прогноз в условиях, которых модель не видела при обучении. Авторы сравнили шесть вариантов LSTM — нейросетей, учитывающих последовательные изменения данных во времени, — на наборе XJTU-SY. В него входят записи вибраций 15 подшипников, испытанных до отказа при трех сочетаниях скорости и нагрузки.

Модель обучали на двух режимах, а проверяли на третьем, последовательно меняя тестовый режим. Из вибраций выделяли признаки раннего предупреждения: статистические

характеристики колебаний, показатели автокорреляции и параметры отдельных частотных диапазонов. Разделить сигнал на диапазоны позволило вейвлет-разложение — метод анализа, который фиксирует изменения частотного состава вибраций.

Результаты показали, что лучшая модель зависит от условий испытаний. При минимальной скорости точнее всего прогнозировала ресурс простая однонаправленная LSTM, при промежуточной — модель с адаптацией к различиям между режимами, а при максимальной — двунаправленная LSTM с механизмом внимания. В отдельном эксперименте добавление вейвлет-признаков улучшило точность прогноза по сравнению со статистическими признаками без вейвлетов.

Авторы продемонстрировали, что точность и объяснимость прогноза не совпадают. Веса механизма внимания распределялись почти равномерно по временным шагам и не указывали, какие частотные признаки определяют результат. Метод SHAP, оценивающий вклад входных признаков, выявил преобладание низкочастотного диапазона при меньших скоростях вращения и среднечастотного — при максимальной. Такое смещение согласуется с физикой повреждений подшипников, где характерные частоты дефектов растут вместе со скоростью вращения. При этом SHAP показывает статистическую связь, а не причинную зависимость.

В работе сделан вывод о ценности физически осмысленных признаков и отдельной проверки объяснений нейросети. Результаты получены на одном стендовом наборе данных с ускоренными испытаниями, поэтому перед промышленным применением подходу потребуется проверка на других данных и режимах эксплуатации.

Оригинал статьи: *Cross-Condition Bearing Prognostics Using Early Warning Signal Features: A Comparative Study of Attention Mechanisms and SHAP-Based Spectral Attribution. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, 2026.*