Новый метод повышает устойчивость диагностики подшипников

Раннее обнаружение дефектов подшипников помогает снизить риск отказов вращающегося оборудования. На практике диагностике мешают шум, изменение нагрузки и слабые признаки начинающегося повреждения. Поэтому алгоритму важно не только распознавать тип неисправности в идеальных лабораторных условиях, но и сохранять точность при ухудшении качества сигнала.

Исследователи Высшей школы управления кибер-физическими системами СПбПУ совместно с коллегами из Ланьчжоуского университета Цзяотун разработали BI-MMGAN — модель для диагностики неисправностей подшипников по вибрационным сигналам. В ее основе лежит сочетание трех подходов. Сначала исходные данные преобразуют в несколько видов изображений, отражающих изменения сигнала во времени и по частотам. Затем специальный модуль, вдохновленный принципами работы зрительной системы, усиливает участки, которые могут соответствовать признакам дефекта.

После этого модель представляет спектральные изображения в виде графов. Их узлами становятся отдельные области изображения, а связи между ними отражают сходство

характеристик. Такой подход позволяет учитывать не только соседние элементы, но и удаленные участки спектра, связанные, например, с гармониками и боковыми полосами. Для объединения разных представлений сигнала используется механизм контрастивного обучения: он помогает сблизить признаки одного и того же дефекта, полученные разными способами, и разделить признаки разных неисправностей.

Метод проверили на трех наборах данных: CWRU, Paderborn и University of Ottawa. Они различаются типами дефектов, условиями экспериментов и способом получения сигналов. В частности, набор University of Ottawa включает данные о естественном развитии неисправностей, что дает возможность проверить модель в условиях, менее близких к идеализированному лабораторному сценарию. Для оценки устойчивости авторы также добавляли к сигналам искусственный шум и проверяли перенос модели между режимами нагрузки.

Авторы продемонстрировали, что на наборе CWRU при наиболее сильном уровне добавленного шума точность BI-MMGAN составила 91,45%. Это на 4,20 процентного пункта выше результата лучшего из сравниваемых методов. На чистых данных CWRU точность составила 99,50% в среднем по четырем режимам нагрузки. На наборах Paderborn и University of Ottawa модель показала точность 97,58% и 97,15% соответственно.

Результаты абляционных экспериментов показали, что на качество диагностики влияют все основные компоненты системы: предварительное усиление спектральных признаков, графовое внимание, обработка дальних связей и выравнивание представлений разных модальностей. При этом приведенные показатели относятся к экспериментам на открытых наборах данных и не означают готовность модели к непосредственному применению на промышленном оборудовании.

В работе сделан вывод о том, что объединение биоинспирированной обработки спектров, графового анализа и сопоставления нескольких представлений сигнала может повысить устойчивость диагностики при шуме и изменении режима работы. Для оценки практической эффективности метода потребуются дополнительные испытания на данных реальных производственных установок и в более разнообразных условиях эксплуатации.

Оригинал статьи: Robust Bearing Fault Diagnosis via Bio-Inspired Spectral Enhancement and Multimodal Contrastive Graph Attention. IEEE Sensors Journal, 2026, Vol. 26, No. 10, pp. 15872–15892.