

ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕГРАДАЦИИ ШПИНДЕЛЬНЫХ ОПОР МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ ПО ДИНАМИКЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Чернов Денис Альбертович

Аспирант кафедры металлообрабатывающих станков и комплексов
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
г. Москва, Российская Федерация

Соколова Полина Игоревна

Студентка магистратуры кафедры высокоэффективных технологий обработки
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представленная научная работа посвящена проблеме оперативной диагностики и предиктивной оценки остаточного ресурса прецизионных подшипников качения шпиндельных узлов металлообрабатывающих станков с ЧПУ. В условиях сверхвысоких скоростей вращения и переменных режимов резания классические виброакустические показатели часто теряют чувствительность к зародковым микродефектам. Авторами предложен оригинальный диагностический подход, основанный на регистрации высокочастотных сигналов акустической эмиссии в диапазоне от ста килогерц до одного мегагерца с их последующей обработкой одномерной глубокой сверточной нейронной сетью. Для решения проблемы «черного ящика» в контур принятия решений встроен алгоритм Integrated Gradients, выполняющий аксиоматическое распределение вкладов временных отсчетов сигнала. В исследовании подробно описана физическая природа подсвечиваемых алгоритмом импульсных пачек, связанных с микропластической деформацией, трением и зарождением подповерхностных усталостных трещин. На базе серии натурных экспериментов на фрезерном обработочном центре подтверждена высокая точность дифференциации видов деградации и доказана смысловая обоснованность формируемых заключений.

Ключевые слова: шпиндельный узел, подшипники качения, металлорежущие станки, акустическая эмиссия, сверточные нейронные сети, Integrated Gradients, трещинообразование, прецизионность, диагностика машиностроения.

INTERPRETABLE NEURAL NETWORK ASSESSMENT OF MECHANICAL DEGRADATION IN MACHINE TOOL SPINDLE BEARINGS BASED ON ACOUSTIC EMISSION DYNAMICS

Chernov Denis Albertovich

Postgraduate Student, Department of Metal-Cutting Machine Tools and Complexes
Moscow State Technological University "STANKIN"
Moscow, Russian Federation

Sokolova Polina Igorevna

Master's Student, Department of High-Efficiency Processing Technologies
Moscow State Technological University "STANKIN"
Moscow, Russian Federation

Abstract

The present scientific work is devoted to the problem of online diagnostics and predictive assessment of the remaining useful life of precision rolling element bearings in CNC machine tool spindle units. Under ultra-high rotational speeds and variable cutting regimes, classical vibroacoustic parameters frequently lose sensitivity to incipient micro-defects. The authors propose an original diagnostic approach based on recording high-frequency acoustic emission signals in the range from one hundred kilohertz to one megahertz, followed by their processing via a one-dimensional deep convolutional neural network. To solve the "black box" problem, the Integrated Gradients algorithm performing axiomatic attribution of signal time-series samples is embedded into the decision-making loop. The study describes in detail the physical nature of the impulse bursts highlighted by the algorithm, which are associated with microplastic deformation, friction, and subsurface fatigue crack initiation. Based on a series of full-scale experiments conducted on a milling machining center, a high accuracy in differentiating types of degradation was confirmed, and the semantic validity of the generated conclusions was proven.

Keywords: spindle unit, rolling bearings, machine tools, acoustic emission, convolutional neural networks, Integrated Gradients, crack formation, precision, machinery diagnostics.

Введение

Точность и производительность современного металлорежущего оборудования напрямую определяются техническим состоянием шпиндельных узлов. Прецизионные подшипники качения, входящие в состав опоры шпинделя, функционируют в условиях жестких допусков, высокой частоты вращения и существенных динамических воздействий, возникающих в процессе резания. Появление минимальных дефектов на дорожках качения или телах качения приводит к снижению жесткости узла, росту температурных деформаций и, как следствие, к браку обрабатываемых деталей.

Традиционный виброконтроль по среднеквадратичному значению виброскорости эффективен на стадиях развитого или критического износа. Однако на этапе зарождения подповерхностных микротрещин более чувствительным физическим индикатором выступает акустическая эмиссия — излучение упругих волн напряжений, вызванное локальной перестройкой структуры материала (двойникованием, движением дислокаций, образованием микротрещин).

Обработка сигналов акустической эмиссии глубокими нейросетевыми архитектурами позволяет фиксировать скрытые временные зависимости без применения сложных процедур ручной фильтрации. При этом внедрение нейросетевых диагностических комплексов в управляющие системы станков тормозится отсутствием прозрачности алгоритмических выводов. Главный механик предприятия должен иметь доказательное обоснование для остановки сложного технологического процесса. Применение метода интегрированных градиентов (Integrated Gradients) гарантирует аксиоматическую строгость интерпретации, точно связывая временные интервалы акустических всплесков с конкретными фазами контакта тел качения.

Методология акустико-эмиссионного анализа и алгоритм интегрированных градиентов

Сформированный экспериментально-аналитический комплекс включает высокочастотные пьезоэлектрические датчики, смонтированные непосредственно на корпусе шпиндельной гильзы, и высокую частоту дискретизации аналого-цифрового преобразователя.

Зарегистрированные непрерывные реализации акустической эмиссии разбиваются на скользящие временные окна и подаются на вход одномерной сверточной нейронной сети (1D-CNN). Модель осуществляет бинарную и многоклассовую классификацию видов деградации опоры.

После вычисления выходного вектора вероятностей активируется модуль Integrated Gradients. Метод вычисляет интеграл от градиентов целевой функции по всему пути от базового нулевого сигнала до текущего входного отрезка, удовлетворяя свойствам полноты и линейной чувствительности.

Физическая интерпретация полученных атрибуций строится на анализе временной структуры подсвеченных сегментов и их сопоставлении с кинематикой подшипника.

Первый аналитический блок связывает выявленные всплески с частотой обращения сепаратора и прохождения тел качения по внутреннему кольцу, что позволяет локализовать дефекты вращающихся элементов.

Второй аналитический блок оценивает амплитудную плотность подсвеченных АЭ-импульсов, позволяя отличать нормальное гидродинамическое трение в смазке от сухих микроконтактов.

Третий аналитический блок идентифицирует высокоамплитудные одиночные акты акустической эмиссии, характерные для процесса подповерхностного микроскола материала.

Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

Экспериментальная проверка проводилась на высокоскоростном фрезерном станке при обработке закаленных сталей. В шпиндельные опоры последовательно устанавливались подшипники с различной степенью наработанного износа и искусственно внесенными микродефектами дорожек качения глубиной от десяти микрометров.

Результаты показали, что разработанная 1D-CNN модель с модулем Integrated Gradients распознает зарождающиеся повреждения подшипников с точностью до девяноста пяти процентов задолго до появления ощутимого вибрационного фона.

В процессе обработки экспериментальных данных получены следующие практические результаты:

Доказано, что метод интегрированных градиентов точно выделяет короткие пачки акустических импульсов длительностью в несколько микросекунд, соответствующих моменту прохождения шарика над микротрещиной;

Установлено, что алгоритм успешно игнорирует высокоамплитудные технологические шумы, возникающие при прерывистом резании фрезой, фокусируясь исключительно на непрерывных акустико-эмиссионных маркерах трения;

Разработана визуальная консоль для оператора станка, отображающая результирующий сигнал с графической подсветкой потенциально опасных интервалов.

Заключение

Сочетание высокочастотной акустической эмиссии, одномерных сверточных сетей и метода Integrated Gradients позволяет создать эффективную и прозрачную систему предиктивного мониторинга шпиндельных опор. Высокая физическая обоснованность алгоритмических решений способствует повышению надежности работы прецизионного металлорежущего оборудования.

В дальнейшем планируется адаптировать предложенную методику для задач онлайн-диагностики тяжелонагруженных опорных узлов тяжелых токарных и карусельных станков.

Литература

1. Пуш А. В. Шпиндельные узлы: Качество и надежность. — М.: Машиностроение, 1992. — 288 с.
2. Грешников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. — М.: Издательство стандартов, 1976. — 272 с.
3. Чернянский П. М., Кузнецов А. С. Диагностика и надежность технологических систем: Учебное пособие. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — 240 с.
4. Подколзин А. А., Сидоров В. В. Оценка износа прецизионных подшипников по параметрам высокочастотной акустической эмиссии // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2021. — № 6. — С. 44–52.
5. 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.
6. Kirichenko A., Belyaev A., Shirokov R. Deep learning for acoustic emission monitoring of high-speed spindle bearings // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2023. — Vol. 185. — P. 109812.