

Сравнительный анализ пьезоакселерометров и МЭМС-акселерометров для мониторинга и диагностики неисправности шагового двигателя

Т.Г. Кормин, И.Н. Тихонов, С.А. Берестова

Уральский федеральный университет

Аннотация: В эпоху перехода к Индустрии 4.0 промышленное оборудование требует высокоэффективных решений для анализа его работоспособности. Современные системы мониторинга и диагностики должны обеспечивать надежное выявление возможных проблем на ранних этапах, даже в сложных эксплуатационных условиях, с минимальными ошибками. При этом важно, чтобы такое оборудование было доступным по цене и компактным для массового применения. В связи с этим, в исследовании сравниваются возможности пьезоакселерометров и МЭМС-акселерометров для анализа вибраций и обнаружения неисправностей шаговых двигателей. В ходе работы проанализированы основные существующие методы виброанализа состояния оборудования, разработано программное обеспечение, реализующие варианты математических моделей для обработки данных инерциальных датчиков ориентации. Описана конструкция стенда и программное обеспечение для датчиков MPU-9250 и AP2037-100-03. Приведены результаты реализации и испытаний датчиков MPU-9250 и AP2037-100-03. Целью данного исследования стало сравнение пьезоакселерометров и МЭМС-акселерометров для оценки их эффективности вибродиагностики шаговых двигателей.

Ключевые слова: мониторинг вибрации, МЭМС датчики, МЭМС акселерометры пьезоакселерометр, индустрия 4.0, предиктивная аналитика, виброанализ.

Введение

Во время работы производственного оборудования его состояние подвержено влиянию множества случайных факторов. Наибольшее влияние на темпы ухудшения состояния оборудования оказывают такие аспекты, как: качество обслуживания, температура окружающей среды, условия процесса эксплуатации, вибрация. Влияние этих факторов приводит к возникновению непредсказуемых изменений технического состояния промышленного оборудования и в результате к возможному выходу оборудования из строя [1].

Согласно концепции предиктивной аналитики, оборудование не должно доходить до состояния полного отказа, если компоненты не обеспечивают необходимые параметры в заданных пределах (технологическая и геометрическая точность, прецессия и т.д.). В этом

отношении отказы элементов и параметрические отказы различны. Для повышения рентабельности производства рекомендуется проводить ремонт не при появлении фиксированной неисправности, а заранее, чтобы сократить время простоя оборудования [2].

Диагностика неисправностей применяется во многих областях промышленности наибольшую эффективность она показала в аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, энергетике, станкостроении и т.д. [3, 4]. В области предиктивного обслуживания все чаще встречаются решения поиска неисправностей, аномальных выбросов с использованием машинного обучения. Использование обученных систем позволяет избежать влияние человеческого фактора [5, 6]. Внедрение машинного обучения возможно только при условии наличия большого набора данных о состоянии оборудования и его постоянного контроля. Получить данные с оборудования можно с использованием датчиков расстояния, температуры, давления, вибрации, крутящего момента, скорости, ускорения. Они позволяют оценить производительность процесса. Информация об оборудовании, полученная со всех типов датчиков, должна храниться в единой базе данных, согласованной во времени. Использование данных с оборудования может позволить определить, сколько деталей можно обработать из партии, сколько инструментов использовалось для создания определенного количества деталей, через какое количество итераций работы стоит провести обслуживание или замену узлов. Отслеживание всех вышеперечисленных аспектов может позитивно сказаться на производственном процессе.

Высокие инвестиционные затраты являются одним из узких мест при внедрении стратегий непрерывного технического обслуживания, основанных на установленных нормах, для чего требуется большое количество датчиков и сложных систем.

Мониторинг состояния на основе вибрации — это зарекомендовавший себя подход, который уже много лет используется промышленностью в программах технического обслуживания [7]. Цель виброанализа — это наблюдение за состоянием оборудования, сопоставление наблюдаемой вибрации с изнашиваемыми механизмами, такими, как подшипники, шестерни, цепи, ремни, щетки, валы, катушки и дополнительное оборудование. В станках с ЧПУ или промышленных роботах установлен, по крайней мере, один перечисленных выше элементов [8].

Обзор предметной области

Акселерометры находят свое применение во многих различных отраслях промышленности:

1. В исследованиях [8-10] описаны возможности анализа состояния фрезерных, токарных ЧПУ станков с использованием вибрационного мониторинга. Авторы приходят к выводу, что внедрение систем контроля вибрации в станки поможет собирать технические данные, описывать индивидуальные параметры производственного объекта при обслуживании и планировании производства. Данные виброанализа содержат информацию, которая указывает, как часто происходит износ инструмента, как правильно вести подсчет периодичности износа инструмента, как новые марки инструментов влияют на станок, с какой периодичностью нужно производить обслуживание или замену узлов машины, т.д.

2. Подшипники, как ключевой компонент вращающихся механизмов. Подшипники качения отвечают за обеспечение точности вращения валов и обеспечение стабильной поддержки машин, поэтому их рабочее состояние напрямую связано с производительностью всей системы. В тяжелых условиях эксплуатации подшипники подвержены различным локальным повреждениям таким как: точечная коррозия, износ и трещины, которые могут привести к ряду неблагоприятных последствий. Мониторинг

состояния подшипников и выявление потенциальных отказов важны для обеспечения безопасности производства и предотвращения ненужных экономических потерь. Согласно исследованиям [11-13], по спектральной диаграмме можно определить точки разрушения подшипников, провести анализ внешнего, внутреннего кольца, сепаратора, шариков.

В исследованиях проводятся эксперименты с использованием МЭМС-датчиков и пьезоакселерометра, однако МЭМС-датчики требуют дальнейших исследований, особенно в сложных условиях эксплуатации. Некоторые исследователи использовали МЭМС-акселерометры вместе с обычными акселерометрами для измерения вибрации машин во время их работы [14-16]. Исходя из проанализированных исследований с использованием различных виброанализаторов, проведено сравнение двух устройств: МЭМС-акселерометра и пьезоакселерометра. Данное сравнение позволило сделать выводы, какое устройство лучше подходит для применения в условиях предиктивной аналитики устройств, какое решение позволяет в полной мере решить задачу прогнозирования отказов в условиях малого количества неисправностей, больших объемов данных, изменяющихся режимов работы оборудования.

Методы обработки сигналов

Анализ вибросигналов – это важная задача в различных областях инженерии, особенно в диагностике состояния машин и оборудования. Существует несколько методов анализа вибрационных сигналов, каждый из которых имеет свои особенности. Перечислим основные методы обработки вибрационного сигнала:

Спектральный анализ (FFT-анализ) основан на преобразовании временной области в частотную, позволяя определить амплитуды и частоты составляющего сигнала. Спектрограммы виброскорости применяются для контроля развития повреждений. Анализ спектрограмм виброускорений

помогает обнаружить проблемы в работе оборудования на начальных этапах. В процессе спектрального анализа учитываются не только частота колебаний, но и величина амплитуды на этой частоте. Основные элементы вибрационного спектра включают следующие компоненты спектрального анализа: оборотная частота, субгармоники, резонансные частоты, негармонические колебания, зубцовые частоты, боковые полосы, вибрации электрического происхождения и шумовые составляющие, возникающие при заеданиях, механических контактах [17-18].

Анализ огибающей (Envelope Analysis) используется для выделения низкочастотной составляющей вибрации, позволяет обнаружить дефекты подшипников на ранних стадиях [19, 20].

Вейвлет-анализ позволяет исследовать сигналы одновременно во временной и частотной областях [21].

Преобразование Гильберта Хуанга (ННТ) — это метод анализа данных, основанный на эмпирическом опыте. Его основным достоинством является обнаружение закономерностей в нелинейных и нестационарных процессах [22,23].

Нейронные сети и машинное обучение - современные методы анализа данных, использующие нейронные сети для распознавания признаков в сигналах. Основной плюс метода возможность автоматически выявлять аномалии и предсказывать возможные сценарии развития, к недостаткам можно отнести необходимость наличия большого количества подготовленных данных для обучения [24-26].

В рамках данного исследования использовался спектральный анализ, вейвлет-анализ, анализ огибающей (Envelope Analysis). Эти методы позволили оценить возможности МЭМС-акселерометра и пьезоакселерометра.

Датчик МЭМС

Датчики МЭМС играют важную роль в ускорении современных технологий. Гироскоп, встроенный в МЭМС-модуль MPU-9250, позволяет измерять угловую скорость, которая при интегрировании со временем дает возможность получать значения о перемещении в пространстве и ориентации датчика. Из-за неточностей в измерении времени, при интегрировании возникают ошибки, которые накапливаются и приводят к ошибкам в определении ориентации. Поэтому гироскопы самостоятельно не способны обеспечивать абсолютно точное измерение ориентации. В отличие от них, акселерометры и магнитометры измеряют гравитационное и магнитное поля Земли, позволяя определить абсолютную ориентацию в пространстве. Однако эти датчики также подвержены влиянию высокочастотных помех, таких как вибрации и дополнительные ускорения, возникающие во время движения [3].

В рамках исследования использовался акселерометр GY-91 с модулем MPU-9250. Трехосевой МЭМС-гироскоп с 16-разрядным АЦП и функцией преобразования сигнала MPU-9250 состоит из трех независимых вибрационных гироскопов МЭМС, которые определяют вращение вокруг осей X, Y и Z. Когда гироскопы поворачиваются вокруг любой из осей, эффект Кориолиса вызывает вибрацию, которая регистрируется емкостным датчиком. Полученный сигнал усиливается, демодулируется и фильтруется для получения напряжения, пропорционального угловой скорости. Диапазон полной шкалы гироскопических датчиков может быть запрограммирован в цифровом виде на ± 250 , ± 500 , ± 1000 или ± 2000 градусов в секунду (dps) [15].

Перед проведением экспериментов было выявлено, что при опросе 8кГц, максимальная частота дискретизации датчика GY-91 составляет 1,3кГц, согласно даташиту MPU-9250 имеет максимальную частоту дискретизации 1 кГц.

Пьезоакселерометр

В качестве пьезоакселерометра в работе использовался AP2037-100-03.

Характеристики AP2037-100-03:

- Коэффициент преобразования 10 мВ/м/с²;
- Относительный коэффициент поперечного преобразования (менее) 0.05;
- Рабочий диапазон частот 0,5-15000 Гц;
- Максимальное значение амплитуды измеряемой величины 500 м·с²;
- Максимальный удар (пиковое значение) 10000 g;
- Частота установочного резонанса в осевом направлении (более) 45 кГц;
- Уровень шума, СКЗ [1 Гц÷10 кГц] (менее) 0,0035 м/с²;
- Выходное сопротивление менее 500 Ом;
- Уровень постоянного напряжения на выходе 8 -13 В;
- Диапазон рабочих температур -55-125 °С;
- Коэффициент влияния температуры окружающего воздуха в диапазоне рабочих температур (±) 0,2 %/°С.

AP2037 может быть закреплен к оборудованию с помощью мастики, магнита, шпильки. Для проведения эксперимента использовалось магнитное крепление.

Стоимость AP2037-100-03 (Одноосевой, 100 мВ/g, IEPЕ, диапазон 15 кГц, кабель 2 м) на момент написания статьи была 20 раз больше, чем у GY-91.

Методология

Описание используемого оборудования. Эксперименты проводились с использованием следующего оборудования, MPU-9250 акселерометра,

вибропреобразователь AP2037-100-03, шумомер шагового двигателям пента 17, драйвера Stepperonline DM320, двигателя постоянного тока 24В, 6,5А. Использование шагового двигателя позволяет создать стенд чувствительный к делению шага на драйвере и оценить уровень вибраций и значения сигналов. Роль активной нагрузки сыграл двигатель постоянного тока. На полученных вибросигналах отчетливо видно изменение сигнала при совпадении вращения двигателей, и при вращении в противоположную сторону.

В процессе исследования измерялись спектры виброскорости в диапазоне от 2 до 500 Гц. В ходе работы использовался вариант вибродиагностики по нескольким уровням:

- 1) диагностика по общему уровню вибрации;
- 2) спектральный анализ

В работе использовались 11 шаговых двигателей, 6 из которых имеют наработку более 5 тыс. часов.

Для закрепления всех компонентов был смоделирован и напечатан корпус стенда, фотография стенда изображена на рис. 1.

Для того чтобы уменьшить влияние внешних электрических наводок использовались экранированные провода.

Методика проведения исследования:

1. Сохранение данных, полученных с пьезоакселерометра и МЭМС акселерометра.
2. Данные обрабатываются с использованием быстрого преобразования Фурье.
3. Анализ полученных зависимостей.

Результаты экспериментов

Разработанный стенд позволяет выявить вибрации, возникающие при работе шагового двигателя. Обработка и построение графиков выполнялось с

использование программ, написанных на Python версии 3.12. На рис. 2 представлен сигнал вращения шагового двигателя, полученного с пьезоакселерометра: пауза; вращение по часовой стрелке; пауза; вращение против часовой стрелки и т.д. На рис. 3 представлена 3D-спектрограмма сигнала, на котором видно, как изменяется спектральная плотность сигнала со временем.

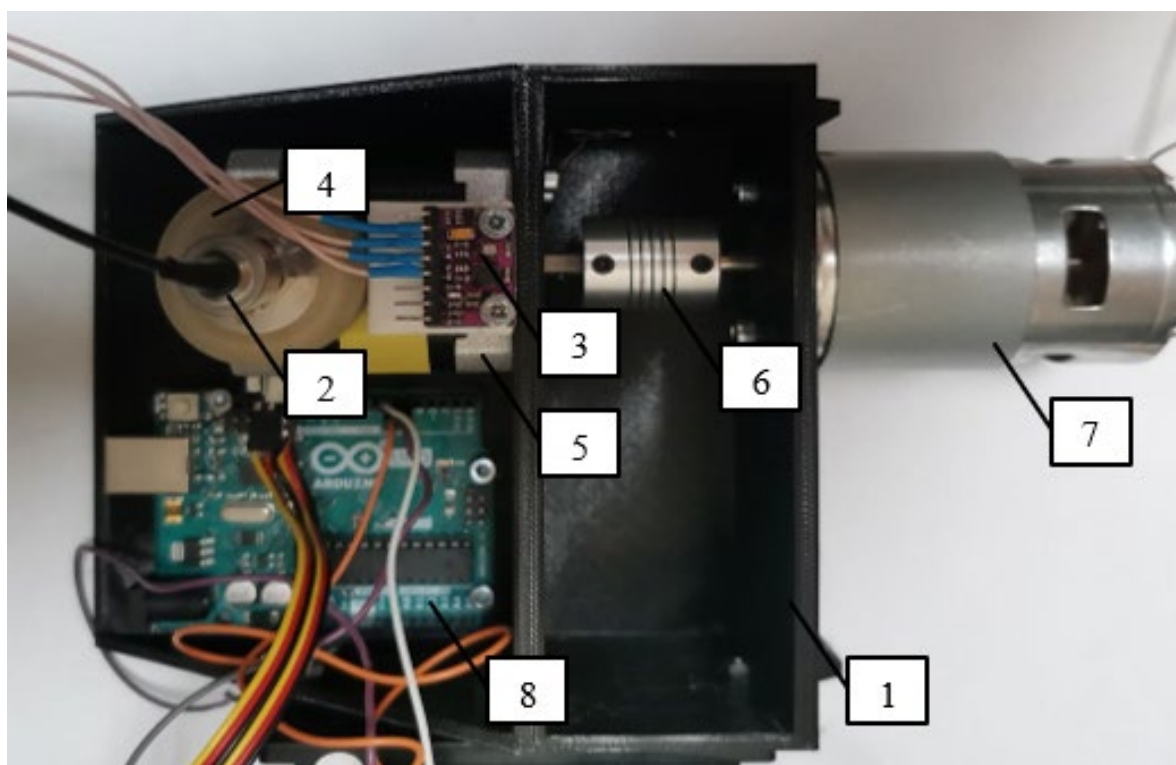


Рис. 1 – Стенд для снятия показаний вибрации: 1 – Корпус, 2 – пьезоакселерометр AP2037-100-03; 3 – акселерометр GY-91; 4 – магнит; 5 – шаговый двигатель nema 17; 6 – муфта; 7 – двигатель постоянного тока; 8 – плата управления шаговым двигателем.

На рис. 4, 5 представлен вибросигнал, получаемый от МЭМС акселерометра (MPU-9250) и пьезоакселерометра. По оси X расположены шкала времени, по оси Y представлена амплитуда сигнала в дБ. Красной линией изображен сигнал пьезоакселерометра AP2037-100-03, синей линией изображен сигнал МЭМС-акселерометра MPU9250. На рис. 5 наглядно

видно, что у МЭМС-акселерометра дискретизация сигнала меньше, поэтому пьезоакселерометр с частотой дискретизации 22кГц позволяет улавливать закономерности в нелинейных и нестационарных процессах, а MPU-9250 с частотой дискретизации 1кГц, может пропустить данный сигнал.

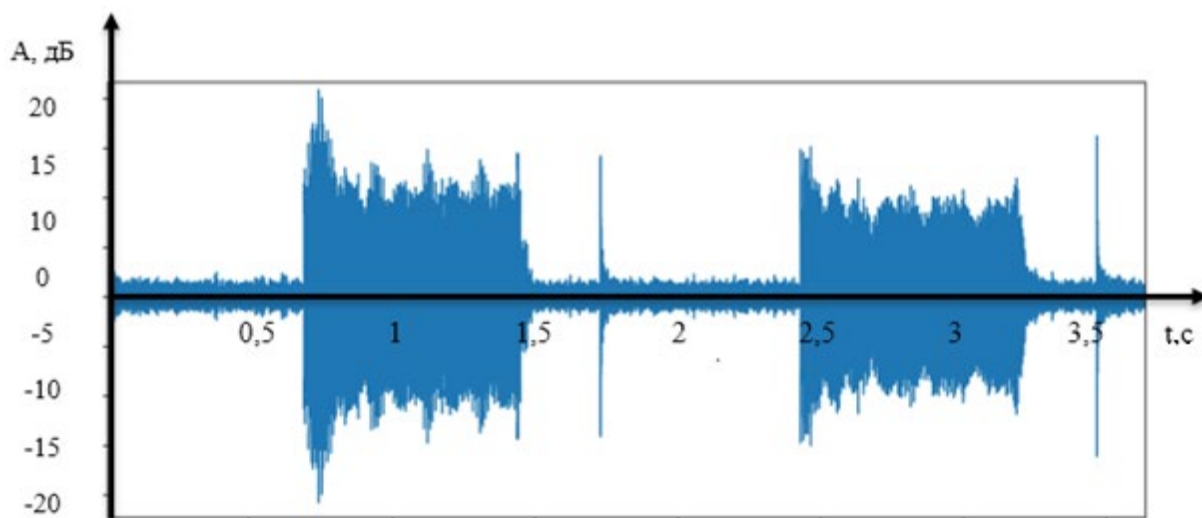


Рис. 2. – Сигнал вращения шагового двигателя

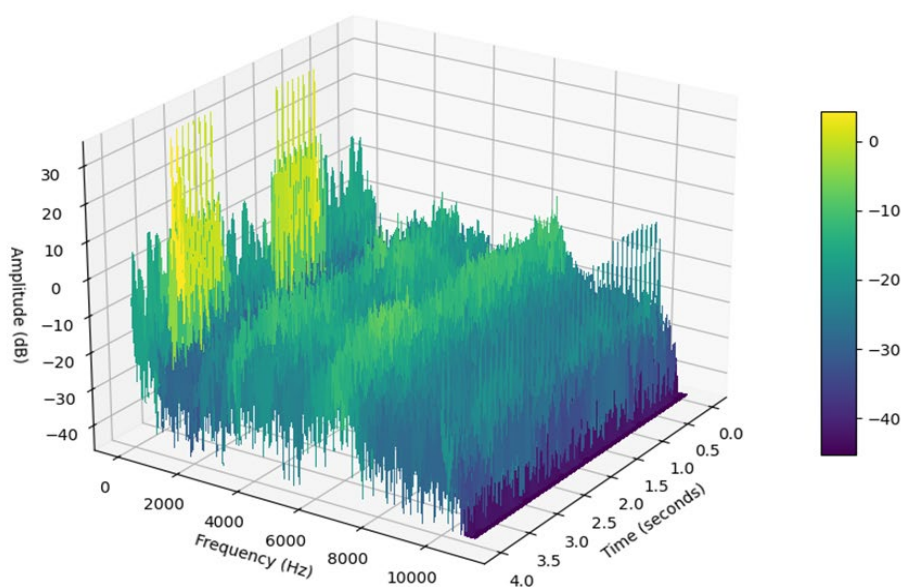


Рис. 3. – 3D спектрограмма сигнала с МЭМС-акселерометра (MPU-9250)

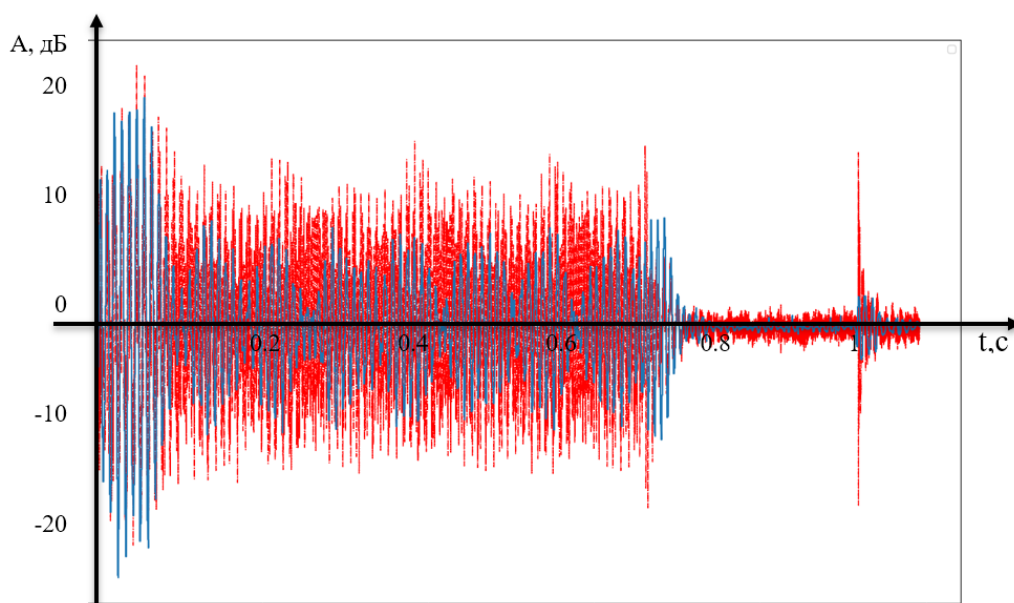


Рис. 4. – Вибросигнал, получаемый от МЭМС-акселерометра (MPU-9250) и пьезоакселерометра (AP2037-100-03). Красная линия - сигнал с пьезоакселерометр, синяя линия - сигнал с МЭМС-акселерометра.

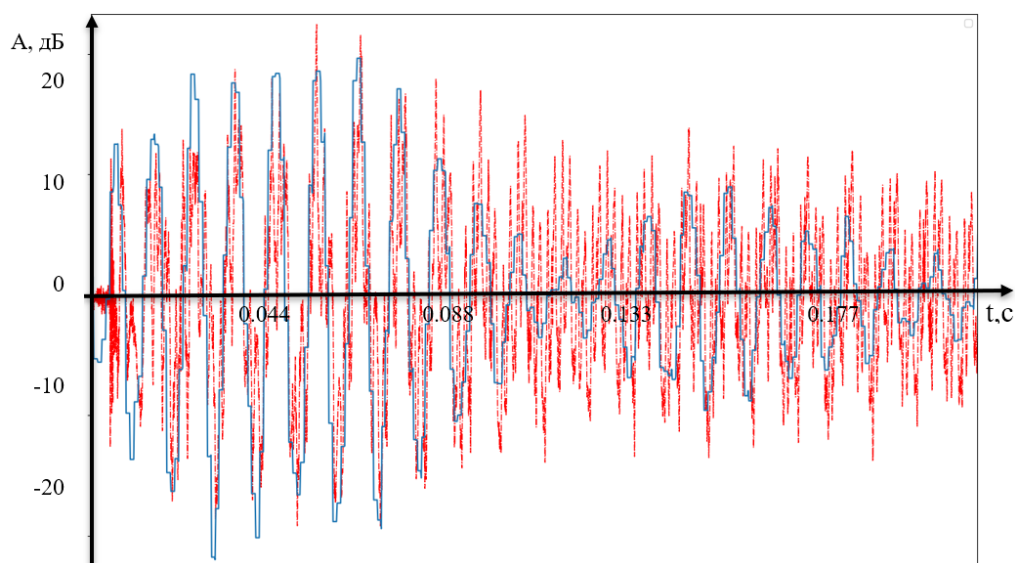


Рис. 5. – Увеличенный график вибросигнала. Красная линия - сигнал с пьезоакселерометр, синяя линия - сигнал с МЭМС-акселерометра.

Сравнение спектрального анализа полученного сигнала показало, что в области 0-500 Гц значения частот акселерометров совпадают. На рис. 6 показана спектрограмма, полученная с MPU-9250 и пьезоакселерометра. Для удобства восприятия оба сигнала были нормализованы по оси Y. На

полученных графиков, что в частотном диапазоне от 80 до 120 Гц (рис. 7) имеют близкие значения амплитуд, а начиная с 250 Гц (рис. 8) амплитуды значительно уменьшаются.

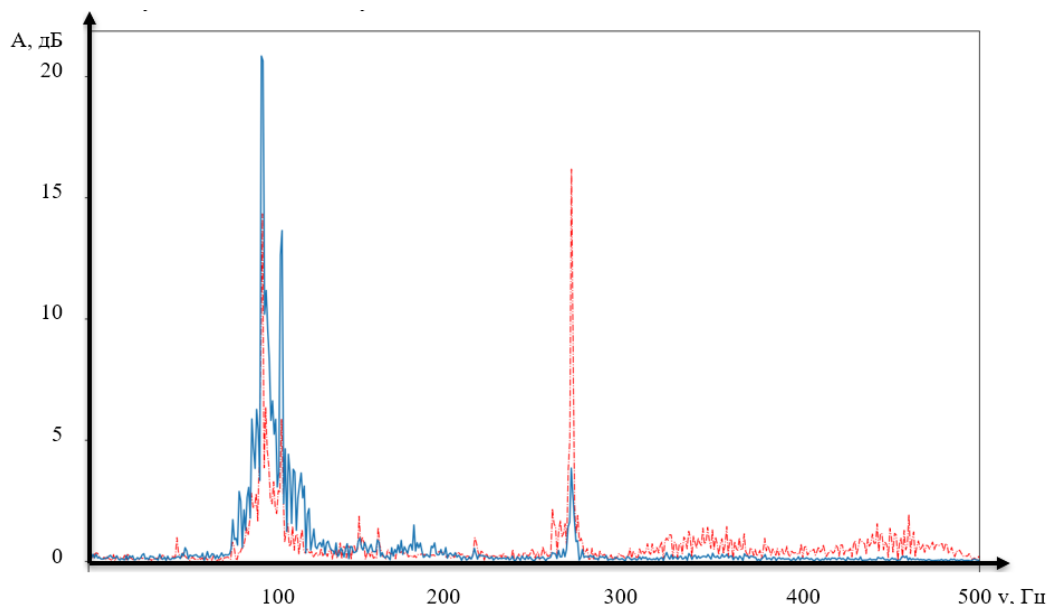


Рис. 6 – Спектрограмма, полученная с МЭМС-акселерометра (MPU-9250) и пьезоакселерометра (AP2037-100-03). Красная линия - сигнал с пьезоакселерометр, синяя линия - сигнал с МЭМС-акселерометра.

Таким образом, можно утверждать, что МЭМС акселерометр, а именно MPU-9250 уступает пьезоакселерометру в частоте дискретизации. По полученным данным, акселерометр МЭМС-акселерометр (MPU-9250) лучше использовать в частотном диапазоне до 400 Гц. Конфигурация MPU-9250 позволит выявить повторяющиеся от времени изменений вибросигналы: дефекты подшипников, редукторов, удары инструмента и т.д. По проведенным тестам пьезоакселерометр лучше подходит для обнаружения не циклических дефектов при нестационарных процессах.

В целях полноценно показать преимущество двух типов устройств, представлена сравнительная таблица МЭМС-акселерометров и пьезоакселерометров (таблица 1).

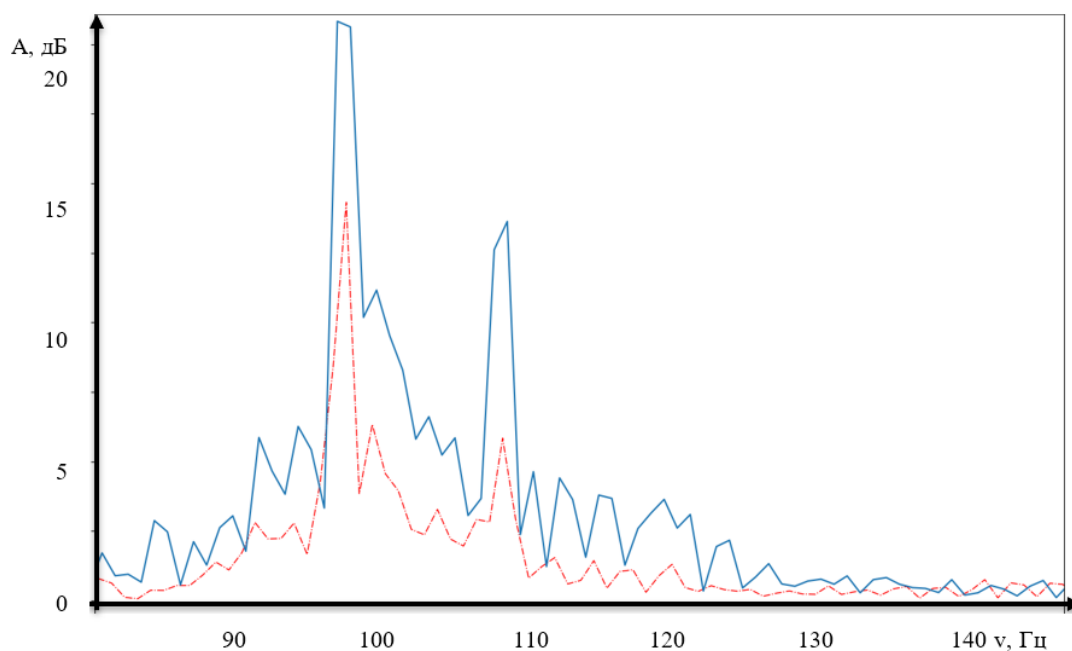


Рис. 7. – Одинаковое положение пиков в частотном диапазоне от 0 до 120 Гц. Красная линия - сигнал с пьезоакселерометр, синяя линия - сигнал с МЭМС-акселерометра.

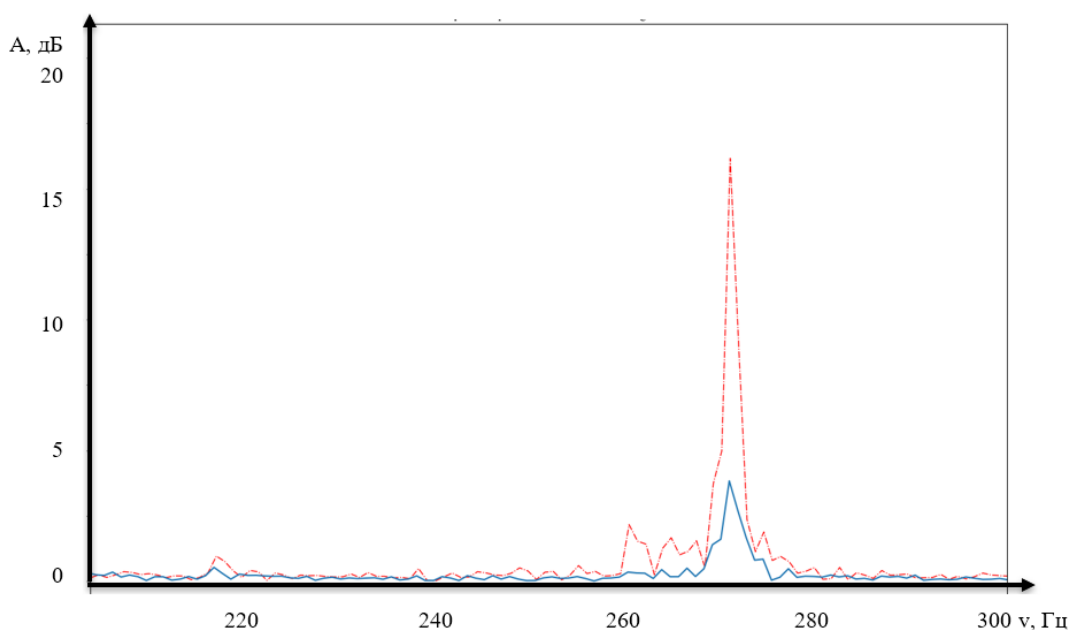


Рис. 8. – Значительное снижение амплитуд, начиная с 250 Гц. Красная линия - сигнал с пьезоакселерометр, синяя линия - сигнал с МЭМС-акселерометра.

Таким образом, МЭМС акселерометры выделяются низкой стоимости, именно этот фактор открывает возможности для использования данных

устройств в профилактическом обслуживании. Учитывая маленький вес и габариты, МЭМС акселерометры могут получить большую популярность для обратной связи оборудования или настройки параметров ускорения, скорости, резонанса. Например, сейчас в прошивку для 3D-принтеров klipper встроена поддержка акселерометров ADXL345, MPU-9250, LIS2DW и LIS3DH. Сигналы с перечисленных акселерометров можно применять для определения резонансных частот принтера по различным осям, а также для автоматической настройки генераторов входных сигналов с целью компенсации резонансов.

Таблица №1

Сравнительная таблица МЭМС-акселерометров и пьезоакселерометров

№ п/п	Характеристика	МЭМС Акселерометр	Пьезоакселерометр
1	Принцип работы	Микроэлектромеханическая система	Пьезоэлектрический эффект
2	Диапазон измерения	До 16g	До 100g
3	Чувствительность	Высокая	Зависит от модели, обычно ниже
4	Частотный диапазон	Ограниченный, до нескольких КГц	Широкий, до десятков МГц
5	Устойчивость к ударам	Низкая	Высокая
6	Потребляемая мощность	Высокая	Низкая
7	Размер и вес	Малый	Большой
8	Цена	Относительно низкая	Высокая
9	Применение	Потребительская электроника, автомобили, бытовые устройства	Научные исследования, авиация и т.д.

Современные МЭМС-датчики вместе с продвинутыми аналитическими программными платформами позволяют компаниям использовать алгоритмы машинного обучения, которые заранее определяют мелкие изменения, приводящие к сбоям в работе.

Заключение

В статье проведено подробное сравнение пьезоакселерометров и МЭМС-акселерометров для анализа вибраций в контексте предиктивной аналитики.

Разработан стенд и программное обеспечение для датчиков МЭМС-акселерометров (MPU 9250) и пьезоакселерометра (AP2037-100-03) позволяет сравнить эффективность двух датчиков. Оба типа датчиков имеют свои достоинства и недостатки, которые определяют их применение в различных отраслях и ситуациях. Выбор конкретного типа акселерометра должен основываться на анализе требований конкретной задачи и доступных ресурсов. Дальнейшее развитие технологий позволит расширить возможности акселерометров и улучшить качество предиктивной аналитики.

В рамках последующих исследований можно провести сравнительный анализ работы акселерометров при различных температурных режимах, исследовать возможности проведения предиктивного анализа данных, полученных с акселерометров с использованием временных рядов, машинного обучения.

Литература

1. Салихов М.Р., Юрьева Р.А. Алгоритм прогнозирования состояния оборудования на основе машинного обучения // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65. №9. С. 648-655. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-648-655.
2. Ansi Z., Shaobo L., Yuxin C., Wanli Y., Rongzhi D., Jianjun H. Limited Data Rolling Bearing Fault Diagnosis With Few-Shot Learning // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 110895-110904. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2934233.
3. Таркинский А.Е. Исследование методов получения и цифровой обработки сигнала датчика поворота колеса сельскохозяйственного трактора.

// Техника и технологии АПК. Вестник. 2018. №5. С. 11-20. DOI: 10.26897/1728-7936-2018-5-11-20.

4. Махов В.Е. Орлов Д.В. Исследование алгоритмов виброакустической диагностики автотранспортных средств // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2422.

5. Rui Z., Ruqiang Y., Zhenghua C., Kezhi M., Peng W., Robert X. G. Deep learning and its applications to machine health monitoring // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. №115. pp. 213-237. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.05.050.

6. Ruonan L., Boyuan Y., Enrico Z., Xuefeng C. Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review // Mechanical Systems and Signal Processing. 2018. №108. pp. 33-47. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.02.016.

7. Golafshan R., Jacobs G., Wegerhoff M., Gaad W. Fault diagnosis for rolling bearings in non-stationary operating conditions caused by torsional vibrations // Drive Systems 7th VDE/VDI Symposium. 2017. URL: ieeexplore.ieee.org/document/8241479.

8. Wszolek G., Czop P., Słoniewski J., Dogrusoz H. Vibration monitoring of CNC machinery using MEMS sensors // Journal of Vibroengineering. 2020. Vol. 22. Iss. 3. pp. 735-750. DOI:10.21595/jve.2019.20788.

9. Янов Е.С., Антонычев С.В., Анцев А.В., Воротилин М.С., Минаков Е.И. Исследование способов контроля состояния фрезерных станков на основе анализа вибрационных характеристик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. №3. С. 157-166. DOI: 10.21685/2072-3059-2024-3-14.

10. Сабиров Ф.С. Повышение эффективности станков на основе их диагностирования и определения виброустойчивости в рабочем пространстве

// Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. по специальности 05.03.01. М.: 2009. 41 с.

11. Бычков А.В. Система виброконтроля электродвигателя с активным ультразвуковым зондированием // Вестник Чувашского университета. 2022. № 1. С. 34-43. DOI:10.47026/1810-1909-2022-1-34-43.

12. Adamczaka S. , Stępiena K., Wrzochal M. Comparative study of measurement systems used to evaluate vibrations of rolling bearings // Procedia Engineering. 2017. №192. pp. 971-975. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.167.

13. Xianglong C., Bingzhi Z., Fuzhou F., Pengcheng J. Optimal resonant band demodulation based on an improved correlated kurtosis and its application in bearing fault diagnosis // Sensors. 2017. №17. 19 p. DOI: 10.3390/s17020360.

14. Albarbar A., Mekid S., Starr A., Pietruszkiewicz R.. Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring: An experimental study // Sensors. 2008. №8. P. 784-799. DOI: 10.3390/s8020784.

15. Golafshan R., Jacobs G., Andary F., Berroth J. A Benchmark Study for MEMS-Sensors-Based Fault Diagnosis for Rolling Bearings // Rolling Bearing Fault Diagnosis Using MEMS Accelerometers. 2019. 16 p.

16. Ломакин М.А. Особенности построения модели погрешности МЭМС-датчиков при решении навигационной задачи // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2398.

17. Bin P., Guiji T., Tian T., Chong Z. Rolling bearing fault diagnosis based on an improved HTT transform // Sensors. 2018. №18. 19 p. DOI: 10.3390/s18041203.

18. Laterra M.. Noise and Vibration Sources in Electric Motor Industrial Applications // Politecnico di torino. 2020. 97 p.

19. Delprete C., Brusa E., Rosso C., Bruzzone F. Bearing Health Monitoring Based on the Orthogonal Empirical Mode Decomposition // Shock and Vibration. 2020. №1. DOI: 10.1155/2020/8761278.

20. Nguyen D. T., Hoang S. H. HUST bearing: a practical dataset for ball bearing fault diagnosis // ResearchGate. 2023. 29 p. DOI: 10.48550/arXiv.2302.12533.
21. Sierra-Alonso E. F., Caicedo-Acosta J., Angel Orozco Gutierrez A., Hector F. Short-Time-Angle Spectral Analysis for Vibration Monitoring of Bearing Failures under Variable Speed // Appl. Sci. 2021. №11. 18 p. DOI: 10.3390/app11083369.
22. Norden E. H., Samuel S.S. Hilbert–Huang Transform and Its Applications // Interdisciplinary Mathematical Sciences. 2014. Vol. 16. 385 p. DOI:10.1142/9789814322874_0005
23. Deepam G., Chirag M., Shankar S. Applications of Digital Signal Processing in Monitoring Machining Processes and Rotary Components: A Review // IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21. pp. 8780-8804. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3050718.
24. Zafar T., Kamal K., Sheikh Z., Mathavan S., Jehanghir A., Ali U. Tool health monitoring for wood milling process using Airborne Acoustic Emission // National University of Sciences and Technology. 2015. 6 p. DOI:10.1109/CoASE.2015.7294315.
25. Nguyen D. T., Hoang S. H. Hust bearing: a practical dataset for ball bearing fault diagnosis // School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology. 2023. 29 p. DOI:10.48550/arXiv.2302.12533.
26. Lijun W., Dongzhi P., Chengguang W., Shitong J., Jie S., Jianyong Z. Fault Diagnosis of Rotating Machinery Bearings Based on Improved DCNN and WOA-DELM // Processes. 2023. №11. 26 p. DOI: 10.3390/pr11071928.

References

1. Salixov M.R., Yureva R.A. Izv. vuzov. Priborostroenie. 2022. T. 65. №9. pp. 648-655. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-648-655.

2. Ansi Z., Shaobo L., Yuxin C., Wanli Y., Rongzhi D., Jianjun H. IEEE Access. 2019. Vol. 7. pp. 110895-110904. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2934233.
 3. Tarkivskij A.E. Teknika i texnologii APK. Vestnik. 2018. №5. pp. 11-20. DOI: 10.26897/1728-7936-2018-5-11-20.
 4. Maxov V.E. Orlov D.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2422.
 5. Rui Z., Ruqiang Y., Zhenghua C., Kezhi M., Peng W., Robert X. G. Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. №115. pp. 213-237. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.05.050.
 6. Ruonan L., Boyuan Y., Enrico Z., Xuefeng C. Mechanical Systems and Signal Processing. 2018. №108. P. 33-47. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.02.016.
 7. Golafshan R., Jacobs G., Wegerhoff M., Gaad W. Drive Systems 7th VDE/VDI Symposium. 2017. URL: ieeexplore.ieee.org/document/8241479.
 8. Wszolek G., Czop P., Słoniewski J., Dogrusoz H. Journal of Vibroengineering. 2020. Vol. 22. Iss. 3. pp. 735-750. DOI:10.21595/jve.2019.20788.
 9. Yanov E.S., Antony`chev S.V., Ancev A.V., Vorotilin M.S., Minakov E.I. Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Povolzhskij region. Texnicheskie nauki. 2024. №3. pp. 157-166. DOI: 10.21685/2072-3059-2024-3-14.
 10. Sabirov F.S. Povy`shenie e`ffektivnosti stankov na osnove ix diagnostirovaniya i opredeleniya vibroustojchivosti v rabochem prostranstve. [Increasing the efficiency of machine tools on the basis of their diagnostics and determination of vibration resistance in the working space]. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni d.t.n. po special`nosti 05.03.01. M.: 2009. 41 p.
 11. Bychkov A.V. Vestnik Chuvashskogo universiteta. 2022. № 1. pp. 34-43. DOI:10.47026/1810-1909-2022-1-34-43.
 12. Adamczaka S., Stępiena K., Wrzochal M. Procedia Engineering. 2017. №192. pp. 971-975. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.167.
-

13. Xianglong C., Bingzhi Z., Fuzhou F., Pengcheng J. Sensors. 2017. №17. 19 p. DOI: 10.3390/s17020360.
 14. Albarbar A., Mekid S., Starr A., Pietruszkiewicz R.. Sensors. 2008. №8. P. 784-799. DOI: 10.3390/s8020784.
 15. Golafshan R., Jacobs G., Andary F., Berroth J. Rolling Bearing Fault Diagnosis Using MEMS Accelerometers. 2019. 16 p.
 16. Lomakin M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2398.
 17. Bin P., Guiji T., Tian T., Chong Z. Sensors. 2018. №18. 19 p. DOI: 10.3390/s18041203.
 18. Laterra M.. Noise and Vibration Sources in Electric Motor Industrial Applications. Politecnico di torino. 2020. 97 p.
 19. Delprete C., Brusa E., Rosso C., Bruzzone F. Shock and Vibration. 2020. №1. DOI: 10.1155/2020/8761278.
 20. Nguyen D. T., Hoang S. H. ResearchGate. 2023. 29 p. DOI: 10.48550/arXiv.2302.12533.
 21. Sierra-Alonso E. F., Caicedo-Acosta J., Angel Orozco Gutierrez A., Hector F. Appl. Sci. 2021. №11. 18 p. DOI:10.3390/app11083369.
 22. Norden E. H., Samuel S.S. Interdisciplinary Mathematical Sciences. 2014. Vol. 16. 385 p. DOI:10.1142/9789814322874_0005
 23. Deepam G., Chirag M., Shankar S. IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21. P. 8780-8804. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3050718.
 24. Zafar T., Kamal K., Sheikh Z., Mathavan S., Jehanghir A., Ali U. National University of Sciences and Technology. 2015. 6 p. DOI:10.1109/CoASE.2015.7294315.
 25. Nguyen D. T., Hoang S. H. School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology. 2023. 29 p. DOI:10.48550/arXiv.2302.12533.
-



26. Lijun W., Dongzhi P., Chengguang W., Shitong J., Jie S., Jianyong Z. Processes. 2023. №11. 26 p. DOI:10.3390/pr11071928.

Дата поступления: 7.04.2025

Дата публикации: 25.05.2025