

DOI 10.54596/2958-0048-2026-3-340-349

УДК 621.313

МРНТИ 68.75.51

**СИСТЕМА ВИБРАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПРОМЫШЛЕННОГО
ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКСЕЛЕРОМЕТРА IIS3DWB****Проселков А.В.^{1*}, Чинишлов В.П.¹, Петров П.А.¹, Оспанова Г.Ж.¹,
Адилбеков А.Е.¹**¹*НАО «Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева»,
Петропавловск, Казахстан***Автор для корреспонденции: proselkov96@mail.ru***Аннотация**

В данной работе вибрационный мониторинг рассматривается в качестве инструмента для выявления скрытых дефектов электродвигателей. Результаты разработки позволяют снизить риски аварийных остановок, тем самым повышая общий ресурс оборудования. Продукт представлен в формате экспериментальной системы виброконтроля, где в качестве ключевого компонента выступает трехосевой цифровой акселерометр IIS3DWB. Предложенная система включает модуль сбора данных (на основе ESP32), модуль ЦОС (цифровая обработка сигналов), интерфейсный компонент (Grafana) и базу данных (InfluxDB). Ключевой особенностью методики является фиксация датчика на корпус электродвигателя с функцией регистрации трех вибрационных компонентов, которые соответственно определяются в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. В ходе экспериментальных исследований установлены показатели точности и производительности системы мониторинга, включая относительную погрешность RMS-ускорения ($\leq 6\%$), Повторяемость измерений, задержку беспроводной передачи данных (≤ 15 мс), время отклика системы (≤ 50 мс), потерю пакетов при передаче (0%). Использование широкополосного сенсора позволило выявить низкочастотные и высокочастотные дефекты, характерные для начальных стадий износа подшипников с минимальной потерей данных и временем отклика системы.

Ключевые слова: вибрационный мониторинг; IIS3DWB; трёхосевой акселерометр; электродвигатель; диагностика оборудования; вибрации; техническое состояние.

**IIS3DWB АКСЕЛЕРОМЕТРІН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП ӨНЕРКӘСІПТІК
ЖАБДЫҚТЫҢ ДІРІЛДІ МОНИТОРИНГ ЖҮЙЕСІ****Проселков А.В.^{1*}, Чинишлов В.П.¹, Петров П.А.¹, Оспанова Г.Ж.¹,
Адилбеков А.Е.¹**¹*«Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті» КЕАҚ,
Петропавл, Қазақстан***Хат-хабар үшін автор: proselkov96@mail.ru***Аңдатпа**

Бұл мақалада дірілді бақылау электр қозғалтқыштарындағы жасырын ақауларды анықтау құралы ретінде қарастырылады. Өзірлеудің нәтижелері апаттық өшіру қаупін азайтуға көмектеседі, осылайша жабдықтың жалпы қызмет ету мерзімін арттырады. Өнім IIS3DWB үш осьті сандық акселерометрі негізгі компонент ретінде қызмет ететін эксперименттік дірілді бақылау жүйесі ретінде ұсынылған. Ұсынылған жүйе деректерді жинау модулін (ESP32 негізінде), DSP модулін (сандық сигналды өңдеу), интерфейс компонентін (Grafana) және дерекқорды (InfluxDB) қамтиды. Әдістemenің негізгі ерекшелігі - үш өзара перпендикуляр жазықтықта анықталатын үш дірілдік компонентті жазу функциясы бар сенсорды электр қозғалтқышының корпусына бекіту. Эксперименттік зерттеулер барысында бақылау жүйесінің дәлдігі мен өнімділік көрсеткіштері, соның ішінде RMS үдеуінің салыстырмалы қателігі ($\leq 6\%$), өлшеудің қайталануы, сымсыз деректерді беру кідірісі (≤ 15 мс), жүйенің жауап беру уақыты (≤ 50 мс) және беру кезіндегі

пакеттердің жоғалуы (0%) белгіленді. Кең жолақты сенсорды пайдалану мойынтіректердің тозуының бастапқы кезеңдеріне тән төмен және жоғары жиілікті ақауларды деректердің минималды жоғалуымен және жүйенің жауап беру уақытымен анықтауға мүмкіндік берді.

Кілт сөздер: діріл мониторингі; IIS3DWB; үш осьті акселерометр; электр қозғалтқышы; жабдықты диагностикалау; діріл; техникалық жағдайы.

VIBRATION MONITORING SYSTEM FOR INDUSTRIAL EQUIPMENT USING THE IIS3DWB ACCELEROMETER

A.V. Prosselkov^{1*}, V.P. Chinishlov¹, P.A. Petrov¹, G.Zh Ospanova¹, A.E. Adilbekov¹

^{1*}Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan

*Corresponding author: proselkov96@mail.ru

Annotation

In this paper, vibration monitoring is considered as a tool for detecting hidden defects in electric motors. The results of the development help reduce the risk of emergency shutdowns, thereby increasing the overall service life of the equipment. The product is presented as an experimental vibration monitoring system, in which the IIS3DWB three-axis digital accelerometer serves as a key component. The proposed system includes a data acquisition module (based on the ESP32), a DSP module (digital signal processing), an interface component (Grafana), and a database (InfluxDB). A key feature of the methodology is the sensor attachment to the electric motor housing with the function of recording three vibration components, which are respectively determined in three mutually perpendicular planes. During the experimental studies, the accuracy and performance indicators of the monitoring system were established, including the relative error of RMS acceleration ($\leq 6\%$), measurement repeatability, wireless data transmission latency (≤ 15 ms), system response time (≤ 50 ms), and packet loss during transmission (0%). The use of a broadband sensor made it possible to identify low- and high-frequency defects characteristic of the initial stages of bearing wear with minimal data loss and system response time.

Keywords: vibration monitoring; IIS3DWB; three-axis accelerometer; electric motor; equipment diagnostics; vibrations; technical condition.

Введение

Техническое состояние роторной машины оценивают прежде всего по вибрации. Электродвигатели, насосы, вентиляторы и компрессоры дают сложный вибрационный сигнал, и по его структуре судят о состоянии механических узлов и степени износа [1–3]. Описываемая система собрана как аппаратно-программный комплекс вибромониторинга на основе информационно-коммуникационных технологий (ИКТ): сенсорный уровень, модуль сбора данных, программная обработка сигналов, хранение и визуализация результатов. Обработка идёт локально, на объекте, поэтому по архитектуре это Industrial IoT. Вибрацию порождают в основном дефекты подшипников, несоосность валов, дисбаланс ротора, ослабленный крепёж и нарушенная геометрия вращающихся элементов. Чем раньше обнаружено отклонение, тем меньше внеплановых остановов и ремонтных затрат [4, 5].

Промышленный интернет вещей (IoT) и цифровизация производства подтягивают за собой спрос на компактные встраиваемые системы, которые считают данные там же, где их снимают [6]. Классическая вибродиагностика к такому не приспособлена: громоздкие аналоговые датчики, отдельные измерительные модули, дорогая аппаратура, обученный персонал. МЭМС-акселерометры этот набор упрощают. На них собирается недорогой диагностический комплекс, и точности хватает для серийной эксплуатации [7].

Под промышленную вибродиагностику подходит трёхосевой широкополосный акселерометр IIS3DWB производства STMicroelectronics [8]. Спектральная плотность шума у него $\sim 56 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$, выход цифровой, по SPI; аналогового тракта в схеме нет, а с ним уходят и паразитные наводки. Рабочая полоса широкая и берёт оба края диагностики: медленные процессы (дисбаланс, несоосность) и быстрые дефекты (локальные повреждения элементов подшипника).

Предприятия переходят на обслуживание по состоянию (predictive maintenance), и непрерывный вибромониторинг из опции превращается в норму [7, 9]. Связка IIS3DWB с недорогой вычислительной платформой вроде ESP32 опускает порог входа в вибродиагностику настолько, что она становится подъёмной для малого и среднего бизнеса.

В опубликованных работах остаётся несколько пробелов. Первый: большинство IoT-систем вибромониторинга [4, 6] строятся на одноосевом аналоговом датчике, а одна ось сужает пространственный охват и снижает шанс вовремя заметить дефект сложной кинематики. Второй: облачная обработка добавляет задержку, и для оперативной диагностики этой задержки уже много [7]. Третий, и его обычно недооценивают: авторы почти не приводят количественной оценки метрологической точности и воспроизводимости в сравнении с эталонным датчиком, поэтому судить о реальной диагностической применимости их систем трудно. Отсюда цель работы: собрать локальную встраиваемую систему вибромониторинга с трёхосевой широкополосной регистрацией и подтвердить её точность количественно.

В работе разрабатывается и исследуется система вибромониторинга электродвигателя: трёхосевой акселерометр IIS3DWB, модуль сбора данных, программный комплекс цифровой обработки сигналов. Разобраны устройство системы, методика установки датчика, алгоритмы спектрального анализа, сопоставление полученных данных с нормативными требованиями. Известные IoT-архитектуры вибромониторинга [4, 6] по большей части используют одноосевые аналоговые датчики или облачную передачу с задержками, неприемлемыми для оперативной диагностики. Здесь регистрация идёт по трём осям в широкой полосе, целиком в локальном встраиваемом IoT-комплексе с открытым стеклом: Python, InfluxDB, Grafana. Вклад работы в другом: эти компоненты сведены в единую аппаратно-программную архитектуру и проверены в эксперименте на реальном промышленном оборудовании.

Материалы и методы исследования

В качестве основного измерительного элемента используется широкополосный МЭМС-акселерометр IIS3DWB (STMicroelectronics) с диапазоном до 6 кГц по каждой оси, подробные характеристики которого приведены в разделе «Введение». Указанная полоса частот достаточна и для выявления низкочастотных явлений вроде дисбаланса или несоосности вала, и для фиксации быстрых ударных процессов в подшипниковых узлах [3, 10]. Благодаря малой собственной шумовой плотности сенсор различает даже слабые вибрационные отклики, которые сопровождают зарождающиеся дефекты.

В работе исследуются вибрационные сигналы промышленного электродвигателя, снимаемые одновременно по трём осям в цифровом формате. Центральный вопрос – применимость алгоритмов цифровой обработки и спектрального анализа этих сигналов в рамках аппаратно-программного ИКТ-комплекса мониторинга.

Сбор данных возложен на микроконтроллер ESP32, который принимает отсчёты от IIS3DWB по шине SPI и передаёт их дальше для обработки. Отсутствие аналогового тракта в цепи измерений исключает – основной источник наводок и температурного

дрейфа в измерительных цепях. Вибрационные сигналы оцифровываются с частотой 10 – 12 кГц – этого достаточно, чтобы без потерь восстановить все частотные составляющие вплоть до верхней границы полосы датчика согласно критерию Найквиста.

Таблица 1. Сравнительные характеристики микроконтроллеров для систем вибрационного мониторинга

Параметр	ESP32	STM32F407	Arduino Nano 33 IoT	Raspberry Pi Pico W
Тактовая частота	240 МГц	168 МГц	48 МГц	133 МГц
ОЗУ	520 КБ	192 КБ	32 КБ	264 КБ
SPI (макс.)	80 МГц	42 МГц	12 МГц	62,5 МГц
Wi-Fi	Встроенный	Нет	Встроенный	Встроенный
Bluetooth	BLE 4.2	Нет	BLE	BLE 5.2
Стоимость модуля	~5 USD	~12 USD	~20 USD	~8 USD
Экосистема	Arduino/ESP-IDF	HAL/CubeMX	Arduino	C SDK/MicroPython

ESP32 выбран из-за встроенного Wi-Fi, тактовой частоты 240 МГц (её достаточно для потокового захвата на 10–12 кГц) и быстрого SPI для связи с IIS3DWB. STM32F407 экономичнее по питанию, но беспроводного канала у него отсутствует: нужен отдельный модуль, конструкция усложняется. У Arduino Nano 33 IoT мало ОЗУ, 32 КБ, и на буфер в 4096 отсчётов по трём осям не хватает. Raspberry Pi Pico W по сумме параметров рядом с ESP32, но проигрывает в тактовой частоте и зрелости IoT-экосистемы. В итоге баланс вычислительных ресурсов, цены и связи лучший именно у ESP32.

Обработка выполняется в несколько шагов. Каждую временную реализацию сначала прогоняют через полосовой фильтр 5–6000 Гц: он срезает постоянную составляющую и внеполосный шум. Далее амплитуды нормируют и считают спектр по БПФ (быстрое преобразование Фурье), чтобы выделить частоты, характерные для конкретных неисправностей [11–13]. Отдельно смотрят полосы, где проявляются дефекты наружного и внутреннего колец подшипника, тел качения и сепаратора. Спектр считали с окном Хэннинга, длина выборки $N = 4096$ отсчётов; при частоте дискретизации 10–12 кГц это даёт разрешение порядка 2,4–2,9 Гц, перекрытие окон 50%. Работы [11–13] изданы в 2004–2013 годах, это базовые тексты по спектральному и вейвлет-анализу вибрационных сигналов; их методология не устарела и применяется до сих пор [14, 15].

Результаты оценивали количественно, по нескольким статистическим процедурам. На каждый режим работы двигателя приходилось не меньше пяти повторных измерений. Среднеквадратическое отклонение (СКО) брали как меру разброса RMS-ускорения между повторами. Относительную погрешность получали, сравнивая средние RMS-ускорения от разработанной системы с показаниями эталонного пьезоэлектрического датчика. Воспроизводимость измерялась коэффициентом вариации (отношение СКО к среднему); во всех режимах он не превышал 3%. Такой набор процедур показывает, стабилен ли измерительный тракт и годится ли система для серийных измерений на производстве.

Через встроенный Wi-Fi ESP32 отдаёт результаты по локальной сети, отдельный кабель к двигателю тянуть не нужно. Данные идут по стеку TCP/IP в InfluxDB; на одну базу можно повесить несколько измерительных узлов сразу, программную часть при этом не трогают. Полосы канала на поток при 10–12 кГц хватает с запасом.

Датчик ставят на корпус двигателя у подшипникового узла: там вибрация информативнее всего. Посадка жёсткая, это шунтирует паразитные резонансы в точке крепления и держит верхнюю границу АЧХ выше 6 кГц.

Испытания производились на трёхфазном асинхронном электродвигателе мощностью 1,5 кВт с номинальной частотой вращения 1450 об/мин. Режимы были два: холостой ход и номинальная нагрузка (активное нагрузочное устройство). Каждый режим повторяли не меньше пяти раз; RMS-ускорение между повторами расходилось не больше чем на 4%, то есть система регистрации стабильна. Затем вводили искусственные дефекты: дисбаланс ротора (пробный груз) и начальный износ подшипника (контролируемое ослабление посадки). Показания сверяли со штатной заводской диагностической системой на контактном пьезоэлектрическом датчике, так и оценивали диагностические возможности предлагаемого решения. Оговоримся: имитация дефекта подшипника через ослабление посадки упрощённая, она не воспроизводит характерные диагностические частоты, которые задаются геометрией конкретного типоразмера подшипника: BPFO (перекачивание по наружному кольцу), BPFI (по внутреннему), BSF (тела качения), FTF (сепаратор). Это ограничение снимем в следующих работах, на подшипниках с реальными дефектами известной геометрии.

В рамках обоснования выбора IIS3DWB, его параметры сравнили с ходовыми акселерометрами MPU-6050 и ADXL1002. В таблице 2 собраны их основные характеристики: рабочая полоса, тип выхода, число осей, назначение. По таблице видно, что IIS3DWB стоит между учебным MPU-6050 и промышленным одноосным ADXL1002 и совмещает многоосевую регистрацию с промышленной пригодностью. (* Шум IIS3DWB средний против промышленного одноосного ADXL1002 (≈ 25 мкг/ $\sqrt{\text{Гц}}$), но заметно ниже, чем у универсальных трёхосевых МЭМС-акселерометров класса MPU-6050 (≈ 400 мкг/ $\sqrt{\text{Гц}}$); для этого класса датчиков такое значение и называют «низким».)

Таблица 2. Сравнительная таблица исследуемого акселерометра с аналогами

Параметр	MPU-6050	ADXL1002	IIS3DWB
Частотный диапазон	до 500 Гц	до 11 кГц (1 ось)	до 6 кГц (3 оси)
Тип выхода	Цифровой	Аналоговый	Цифровой
Количество осей	3	1	3
Уровень шума	Высокий	Низкий	Низкий*
Назначение	Учебное	Промышленное	Промышленное

На рисунке 1 представлена структурная схема системы, включающая сенсор IIS3DWB в качестве базового модуля перцепции исследуемых вибрационных параметров. Наряду с вышеотмеченным датчиком дополняют системообразующую структуру следующие компоненты: промышленное оборудование (на схеме представлено в виде промышленного электродвигателя), ESP32 (микроконтроллер или отладочная плата с функцией сбора данных), Wi-Fi (передача данных), InfluxDB (База данных), Модуль обработки и Grafana (Дашборд UI).

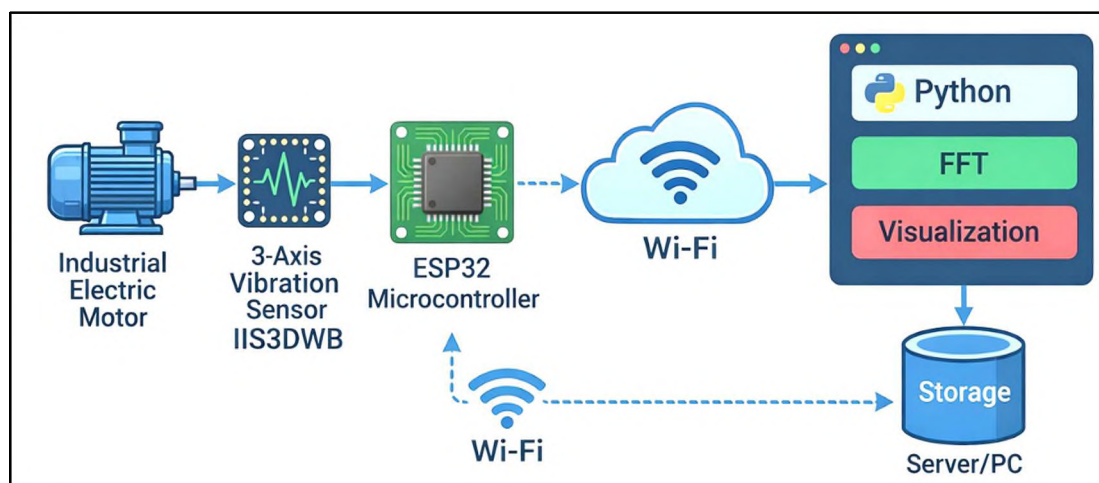


Рисунок 1. Структурная схема системы вибрационного мониторинга

Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментальных исследований установлено, что система вибрационного мониторинга, реализованная на базе микроконтроллера ESP32 и трёхосевого цифрового акселерометра IIS3DWB, обеспечивает устойчивую регистрацию вибрационных ускорений в широком частотном диапазоне до 6 кГц. Измерения выполнялись по трём взаимно перпендикулярным осям, трёхосевой сигнал обеспечивал пространственную локализацию вибрационных процессов в двигателе и описываемых по формуле (1).

$$a_i(t) = \frac{\Delta v_i(t)}{\Delta t}, \quad i \in \{X, Y, Z\} \quad (1)$$

где $a_i(t)$ – мгновенное вибрационное ускорение по соответствующей оси, $\Delta v_i(t)$ – приращение скорости колебаний, Δt – интервал дискретизации.

При нормальном режиме работы электродвигателя зарегистрированные пиковые значения ускорения вибрации по формуле (2) составили 0,12 g по оси X, 0,15 g по оси Y и 0,10 g по оси Z (здесь и далее $g = 9,81 \text{ м/с}^2$); сводные данные по всем режимам приведены в таблице 3.

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a^2(n)} \quad (2)$$

где N – количество отсчётов временного сигнала, $a(n)$ – значение вибрационного ускорения по оси i в дискретный момент времени n (формула применяется независимо для каждой из осей $i \in \{X, Y, Z\}$).

Спектральный анализ сигналов по формуле (3) показал доминирование низкочастотных компонентов, соответствующих основной частоте вращения ротора и её гармоникам, при отсутствии выраженных высокочастотных составляющих — признак исправного состояния оборудования. Моделирование дефектных состояний позволило зафиксировать ряд ценных паттернов. Одним из которых является увеличение

амплитудных вибраций по шкале абсцисса в области от 0 до 0,25g. При этом закономерным оказались гармонически компоненты в диапазоне 30 и 50 Гц и высокочастотные всплески, превышающие 1 кГц.

При моделировании дефектных состояний, включающих дисбаланс ротора и начальную стадию износа подшипников, были зафиксированы характерные изменения вибрационных параметров. В частности, наблюдалось увеличение амплитуды вибраций по оси X до 0,25 g, появление дополнительных гармонических составляющих в диапазоне 30–50 Гц, а также рост уровня высокочастотных компонентов спектра свыше 1 кГц. Такие изменения характерны для типовых механических неисправностей роторных машин (таблица 3).

Таблица 3. Экспериментальные вибрационные параметры электродвигателя в различных режимах работы

Параметр	Нормальный режим	Дефект: дисбаланс ротора	Дефект: начальный износ подшипника
Пиковое ускорение, ось X (g)	0,12	0,25	0,25
Пиковое ускорение, ось Y (g)	0,15	—	—
Пиковое ускорение, ось Z (g)	0,10	—	—
Характерный диапазон частот (Гц)	20–45	30–50	> 1000
Тип спектральных компонентов	Частота вращения, гармоники	Гармоники дисбаланса	Высокочастотные пики
Техническое состояние	Норма	Дефект выявлен	Дефект выявлен

$$A(f_k) = \sum_{n=0}^{N-1} a(n) \cdot e^{-j2\pi kn/N} \quad (3)$$

где $A(f_k)$ – комплексная амплитуда спектральной составляющей на частоте f_k , a_n – дискретный сигнал вибрации по оси i (аналогично формуле (2), применяется для каждой оси независимо), N – длина выборки.

С точки зрения воспроизводимости и быстродействия предлагаемая системы можно считать допустимой к применению в целях вибрационного мониторинга. Так как модель добротнo согласуется со штатной заводской системой. Доказательствами можно считать корреляцию основного частотного диапазона 20–45 Гц. Более детально вибрационные показатели интерпретируются в таблице 4.

Таблица 4. Экспериментальные показатели точности и производительности системы мониторинга

Показатель	Значение
Относительная погрешность RMS-ускорения (5–3000 Гц)	≤ 6%
Относительная погрешность RMS-ускорения (3000–6000 Гц)	≤ 9%
Повторяемость измерений (СКО от среднего)	< 3%
Расхождение между повторными измерениями RMS	≤ 4%
Время отклика системы	≤ 50 мс
Задержка беспроводной передачи данных	≤ 15 мс
Частота дискретизации вибрационного сигнала	10–12 кГц
Потери пакетов при передаче (локальная сеть)	0%

В Базе Данных InfluxDB в период проведения серии экспериментов не зафиксированы потери пакетов данных в процессе передачи трехосевых отчетов ускорений. При этом задержка доставки не превышала 15 мс, что для предлагаемого стека Wi-Fi и TCP/IP считается допустимым показателем в условиях заданной дискретизации.

Совместный анализ временных реализаций и спектров по трём осям оказался заметно информативнее одноосевого: он позволил определить не только интенсивность, но и преимущественное направление вибрационных воздействий, что снижает вероятность пропуска начинающегося дефекта. Сводная визуализация вибрационных сигналов, результатов БПФ-анализа и диагностических показателей в нормальном и дефектном режимах представлена на рисунке 2.



Рисунок 2. Дашборд системы вибрационного мониторинга: временные реализации вибрационных сигналов по осям X, Y, Z , спектральный анализ (БПФ) и сводные диагностические показатели

С алгоритмической стороны главным элементом системы служит потоковый спектральный анализ: программа непрерывно вычисляет БПФ и автоматически извлекает амплитуды в заранее заданных диагностических полосах – 20–50 Гц (гармоники дисбаланса) и выше 1 кГц (признаки износа подшипника) [16]. Накопленный массив спектральных данных в дальнейшем планируется использовать для обучения простых классификаторов (k-NN, SVM), чтобы определять тип дефекта по спектральному профилю.

Экспериментальные данные свидетельствуют о пригодности акселерометра IIS3DWB для вибрационного мониторинга промышленного оборудования и его использования в системах технического обслуживания по состоянию [5, 7]. Разработанная система допускает встраивание в промышленную IoT-инфраструктуру и

масштабирование на группу агрегатов (горизонтальное масштабирование за счёт подключения дополнительных узлов ESP32 к единой брокерской шине) и использована в корпоративных платформах управления техническим состоянием электромеханического оборудования [17].

Заключение

1) Разработанная система реализована как аппаратно-программный ИКТ-комплекс вибрационного мониторинга, включающий: сенсорный уровень (IIS3DWB), модуль сбора данных (ESP32), цифровую обработку вибрационных сигналов (фильтрация, БПФ), передачу, хранение и визуализацию данных (Wi-Fi, InfluxDB, Grafana) — для применения в задачах предиктивного обслуживания промышленного оборудования.

2) В ходе работы предложена аппаратно-программная архитектура и методика цифровой обработки сигналов для вибрационного мониторинга промышленного оборудования. Трёхосевой сенсор IIS3DWB в данной архитектуре охватывает диапазон 5–6000 Гц и позволяет оценить состояние двигателя по всем пространственным составляющим вибрации.

3) Установлено, что использование широкополосного сенсора IIS3DWB с низким уровнем собственных шумов обеспечивает выявление как низкочастотных дефектов, связанных с дисбалансом и несоосностью, так и высокочастотных компонентов, характерных для начальных стадий износа подшипников.

4) Реализованная аппаратно-программная архитектура на базе ESP32 и методов цифровой обработки сигналов обеспечивает устойчивый сбор, анализ и визуализацию вибрационных данных в режиме реального времени.

5) Сравнительный анализ с альтернативными акселерометрами показал, что IIS3DWB является оптимальным компромиссом между стоимостью, частотным диапазоном и диагностическими возможностями для задач промышленного вибромониторинга.

6) По итогам лабораторных испытаний система подтвердила работоспособность и допускает встраивание в действующие платформы управления производством.

Примечание: Во время подготовки данной рукописи авторы использовали инструменты искусственного интеллекта (ChatGPT, Gemini, Claude) для помощи в редактировании текста разделов «Материалы и методы исследования» и «Результаты и их обсуждение». Все научные интерпретации были выполнены авторами. Инструменты с поддержкой ИИ не применялись для сбора данных или статистического анализа. Все содержание материала было проверено и верифицировано авторами, которые несут полную ответственность за содержание и оригинальность рукописи».

References:

1. Bagri, I.; Tahiry, K.; Hraïba, A.; Touil, A.; Mousrij, A. Vibration Signal Analysis for Intelligent Rotating Machinery Diagnosis and Prognosis: A Comprehensive Systematic Literature Review. *Vibration* 2024, 7, 1013–1062. <https://doi.org/10.3390/vibration7040054>.
2. Jardine, A.K.S.; Lin, D.; Banjevic, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>
3. Randall, R.B.; Antoni, J. Rolling element bearing diagnostics – a tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(2), 485–520. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.017>

4. Ibrahim, Said; Go, Eun-Myeong; Iranda, Jennifer. (2024). Scalable and Secure IoT-Driven Vibration Monitoring: Advancing Predictive Maintenance in Industrial Systems. *Journal of Technology Informatics and Engineering*, 3. 370-381. <https://doi.org/10.51903/jtie.v3i3.210>.
5. Tiboni, M.; Remino, C.; Bussola, R.; Amici, C. A review on vibration-based condition monitoring of rotating machinery. *Applied Sciences*, 2022, 12(3), 972. <https://doi.org/10.3390/app12030972>.
6. Kolok, P.; Hodoň, M.; Ševčík, P.; Hotz, L.; Remy, N. Low-Cost IoT-Based Predictive Maintenance Using Vibration. *Sensors* 2025, 25, 6610. <https://doi.org/10.3390/s25216610>.
7. Ayvaz, S.; Alpay, K. Predictive maintenance system for production lines in manufacturing: A machine learning approach using IoT data in real-time. *Expert Systems with Applications*, 2021, 173, 114598. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114598>
8. Güler, Ümit & Bhuiyan, Mohammad & Mamur, Hayati. (2025). Vibration-based fault detection in cooling systems. *Latin America 11th International conference on scientific researches*. Pp. 198 – 202.
9. Lei, Y.; Yang, B.; Jiang, X.; Jia, F.; Li, N.; Nandi, A.K. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 138, 106587. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106587>.
10. Yan, R.; Gao, R.X.; Chen, X. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications. *Signal Processing*, 2014, 96, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.04.015>
11. Antoni, J. Cyclic spectral analysis of rolling-element bearing signals: Facts and fictions. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 304(3–5), 497–529. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.02.029>
12. Lei, Y.; Lin, J.; He, Z.; Zuo, M.J. A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 35(1–2), 108–126. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.09.015>
13. Peng, Z.K.; Chu, F.L. Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: A review with bibliography. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2004, 18(2), 199–221. [https://doi.org/10.1016/S0888-3270\(03\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0888-3270(03)00075-X)
14. Fu, S.; Wu, Y.; Wang, R.; Mao, M. A Bearing Fault Diagnosis Method Based on Wavelet Denoising and Machine Learning. *Applied Sciences*, 2023, 13(10), 5936. <https://doi.org/10.3390/app13105936>
15. Fu, G.; Wei, Q.; Yang, Y. Bearing fault diagnosis with parallel CNN and LSTM. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2024, 21(2), 2385–2406. <https://doi.org/10.3934/mbe.2024105>
16. Zhang, S.; Zhang, S.; Wang, B.; Habetler, T.G. Deep learning algorithms for bearing fault diagnostics – a comprehensive study. *IEEE Access*, 2020, 8, 29857–29881. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972859>
17. Suryowinoto, Andy & Albanna, Isa & A., M. (2025). Smart Predictive Maintenance for Centrifugal Pumps: How IoT Sensors Reduce Downtime by Monitoring Vibration, Current, and Seal Integrity. *International Journal of Artificial Intelligence & Robotics (IJAIR)*, 7. 18-25. <https://doi.org/10.25139/ijair.v7i1.10398>.

Information about the authors

A.V. Prosselkov – corresponding author, doctoral student, Department of Energetic and radioelectronics, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: prosselkov96@mail.ru; ORCID: 0009-0002-9949-0312;

V.P. Chinishlov – master student, Department of Energetic and radioelectronics, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: vladislav-chin@mail.ru; ORCID: 0009-0002-9520-2440;

P.A. Petrov – PhD, Department Associate Professor, Department of Energetic and radioelectronics, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: paolo1988@mail.ru; ORCID: 0000-0001-6669-5149;

G.Zh. Ospanova – PhD, Head of the Admission and Recruiting Office, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: gzhospanova@ku.edu.kz; ORCID: 0000-0002-3156-6045;

A.E. Adilbekov – doctoral student, Department of Energetic and radioelectronics, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: alibekadilbek93@mail.ru; ORCID: 0000-0002-2658-8792.