

Царева Светлана Константиновна.

студентка 2-ого курса направления

«Цифровые технологии в горном деле»

ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет», Россия, г.Магадан

Пличко Сергей Сергеевич

Ассистент кафедры цифровой инженерии

ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет», Россия, г.Магадан

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВИБРАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Аннотация. В статье представлена разработка недорогой системы мониторинга технического состояния промышленного оборудования, основанной на регистрации и анализе вибрационных сигналов с применением микроконтроллера ESP32 и трехосевого акселерометра. Актуальность работы обусловлена переходом промышленных предприятий к стратегиям обслуживания по техническому состоянию, в которых вибродиагностика рассматривается как один из наиболее информативных методов раннего выявления дефектов вращающихся машин [1].

Предложена архитектура аппаратно-программного комплекса, включающая узел съема данных, модуль предварительной обработки и алгоритм порогового выявления аномалий. В качестве диагностических признаков использованы среднеквадратическое значение вибрации, коэффициент пика и спектральная энергия в рабочей полосе частот. Показано, что применение микроконтроллерной платформы позволяет реализовать локальную обработку сигнала в реальном времени и передавать оператору только информативные результаты, что снижает требования к каналу связи и стоимости системы [2, с. 45]. Полученные положения могут быть использованы при создании доступных систем предиктивного обслуживания на предприятиях малого и среднего масштаба.

Ключевые слова: вибродиагностика, мониторинг состояния, предиктивное обслуживание, промышленное оборудование, ESP32, акселерометр, анализ вибраций, Internet of Things.

Abstract. The article presents the development of an inexpensive system for monitoring the technical condition of industrial equipment based on the registration and analysis of vibration signals using an ESP32 microcontroller and a three-axis accelerometer. The relevance of this work is due to the transition of industrial enterprises to maintenance strategies based on the technical condition, in which vibration diagnostics is considered as one of the most informative methods for early detection of defects in rotating machines [1].

The paper proposes an architecture of a hardware and software complex, which includes a data acquisition unit, a pre-processing module, and a threshold detection algorithm for anomalies. The diagnostic features used are the root-mean-square value of vibration, the peak coefficient, and the spectral energy in the operating frequency band. It is shown that the use of a microcontroller platform allows for real-time local signal processing and the transmission of only informative results to the operator, which reduces the requirements for the communication channel and the cost of the system [2, p. 45]. The results can be used to create affordable predictive maintenance systems for small and medium-sized enterprises.

Keywords: vibration diagnostics, condition monitoring, predictive maintenance, industrial equipment, ESP32, accelerometer, vibration analysis, Internet of Things.

Введение

Современные предприятия стремятся сократить внеплановые простои оборудования и перейти от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому техническому состоянию. Для вращающихся машин, включая электродвигатели, вентиляторы, насосы и компрессоры, одним из наиболее чувствительных индикаторов развивающихся дефектов является изменение вибрационного состояния [3]. Вибрационный контроль позволяет выявлять небаланс, расцентровку, ослабление креплений, дефекты подшипников и другие отклонения еще до перехода отказа в аварийную стадию [4].

Международный стандарт ISO 20816-1 устанавливает общие условия и процедуры измерения и оценки вибрации машин по измерениям на невращающихся частях, что делает его важной нормативной основой для проектирования систем мониторинга [5]. При этом промышленное измерительное оборудование для непрерывной вибродиагностики нередко требует значительных затрат на внедрение, интеграцию и сопровождение. По этой причине актуальной является разработка компактных и недорогих решений, способных обеспечить первичный контроль состояния оборудования без глубокой модернизации производственной инфраструктуры [6, с. 112].

Развитие микроконтроллерных платформ и MEMS-акселерометров позволило создать предпосылки для построения автономных диагностических узлов с локальной обработкой сигналов. По данным современных обзоров, акселерометры остаются базовым типом датчиков для систем вибромониторинга, а низкобюджетные цифровые платформы становятся перспективной основой для распределенных решений в задачах predictive maintenance [7]. В связи с этим целью настоящей статьи является разработка и научное обоснование системы мониторинга состояния промышленного оборудования на основе анализа вибраций с использованием микроконтроллера и акселерометрического датчика.

Материалы и методы

Объект и постановка исследования

Объектом исследования является вращающееся промышленное оборудование малой и средней мощности, прежде всего электродвигатели и вентиляторные установки, для которых характерны вибрационные диагностические признаки. Предмет исследования составляет вибрационный сигнал, регистрируемый на корпусе агрегата в нормальном и аномальном режимах работы. В рамках работы решались задачи выбора аппаратной платформы, определения информативных признаков, построения алгоритма локальной обработки и разработки процедуры классификации состояния оборудования на основе пороговых критериев.

Архитектура системы

Предлагаемая система включает три функциональных уровня: аппаратный, алгоритмический и прикладной. Аппаратный уровень состоит из микроконтроллера ESP32, трехосевого акселерометра и модуля беспроводной передачи данных. Выбор ESP32 обусловлен сочетанием достаточной вычислительной производительности, наличия встроенных интерфейсов связи и широкой доступности элементной базы, что делает платформу удобной для создания автономных измерительных устройств [8].

Акселерометр размещается на корпусе диагностируемой машины в зоне наибольшей вибрационной чувствительности. Сигнал считывается по трем осям, после чего формируется результирующий или наиболее информативный одномерный канал для последующей обработки. Прикладной уровень обеспечивает передачу диагностического статуса на локальную панель, в веб-интерфейс либо в диспетчерскую систему предприятия.

Сбор и предварительная обработка данных

Вибрационный сигнал регистрируется с частотой дискретизации 500-2000 Гц, что соответствует диапазону, достаточному для фиксации основных диагностически значимых составляющих колебаний малых и средних вращающихся машин, описываемых в исследованиях по condition monitoring [1, 9]. Перед вычислением признаков выполняются калибровка нулевого уровня, удаление постоянной составляющей и цифровая фильтрация сигнала. В зависимости от конструкции объекта может применяться низкочастотная или полосовая фильтрация для подавления дрейфа и высокочастотного шума.

Для анализа поток данных разбивается на окна фиксированной длины 1-2 с. Такой подход позволяет совмещать достаточную временную локализацию с устойчивостью статистических характеристик и подходит для реализации в режиме реального времени на микроконтроллерной платформе [2].

Извлечение диагностических признаков

Для оценки состояния оборудования использован набор вычислительно простых, но информативных признаков, пригодных для встраиваемой реализации. Среднеквадратическое значение вибрации рассчитывается по выражению

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

где x_i - отсчеты вибрационного сигнала, N - число отсчетов в окне.

Коэффициент формы определяется как

$$K_f = \frac{RMS}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|}$$

а коэффициент пика - как

$$K_p = \frac{X_{max}}{RMS}$$

Дополнительно оценивается спектральная энергия в рабочей полосе частот и в области основной гармонике вращения. Согласно современным обзорам, сочетание временных и спектральных признаков обеспечивает достаточную чувствительность к

наиболее распространенным дефектам вращающихся машин, включая небаланс и повреждения подшипников [3, 7].

Алгоритм выявления аномалий

Алгоритм диагностики построен по принципу сравнения текущих параметров вибрации с эталонным профилем, полученным в период штатной работы машины. На этапе обучения формируются базовые диапазоны значений признаков для нормального режима, после чего каждый новый временной фрагмент сравнивается с установленными порогами. При превышении одного порога формируется предупреждение, а при совместном превышении нескольких критериев - аварийное сообщение.

Такой подход соответствует практике промышленного мониторинга, где многокритериальная оценка предпочтительнее одиночного индикатора, поскольку повышает устойчивость к случайным помехам и единичным выбросам. Для оператора предлагается трехуровневая шкала интерпретации состояния: «норма», «предупреждение», «авария».

Результаты и обсуждение

Разработанная архитектура системы демонстрирует возможность построения работоспособного узла вибромониторинга на доступной микроконтроллерной базе. При штатной работе оборудования ожидается стабильное значение RMS, умеренные пики сигнала и выраженное преобладание основной частоты вращения в спектре. При появлении небаланса или ослабления крепления наблюдается рост общей вибрационной энергии, увеличение пиковых значений и перераспределение энергии по гармоническим составляющим, что соответствует типовым диагностическим проявлениям, описанным в профильной литературе [4, 9].

Научная новизна предложенного подхода заключается не в использовании отдельно взятых методов виброанализа, а в их адаптации к малоресурсной платформе с локальной обработкой и интегральной логикой принятия решения. Практическая ценность системы определяется тем, что основная обработка выполняется непосредственно на периферийном устройстве, а наружу передаются не полные потоки сырых данных, а компактные диагностические показатели и статусы. Это уменьшает сетевую нагрузку и делает систему пригодной для распределенного мониторинга в условиях ограниченной инфраструктуры.

Сравнение с классическими промышленными системами показывает, что предлагаемое решение уступает специализированным комплексам по метрологическому

классу и глубине аналитики, однако выигрывает в стоимости, простоте внедрения и масштабируемости. Для задач первичной диагностики, раннего оповещения и учебно-исследовательских стендов такой компромисс представляется оправданным. Дополнительное повышение достоверности возможно при объединении вибрационных данных с измерением температуры, тока электродвигателя и акустических характеристик, что также поддерживается современными тенденциями развития систем predictive maintenance.

Практическая реализация

Экспериментальная реализация может быть выполнена на лабораторном электродвигателе или вентиляторе, на корпусе которого жестко закрепляется акселерометр. На первом этапе записывается эталонный сигнал в нормальном режиме, затем последовательно моделируются отклонения: частичное ослабление крепежа, рост дисбаланса или увеличение механической нагрузки [8]. Для каждого режима рассчитываются значения RMS, коэффициента пика и спектральной энергии, после чего определяются граничные значения для формирования диагностических сообщений.

С инженерной точки зрения такое решение особенно перспективно для малых и средних предприятий, где внедрение полноценных коммерческих систем вибродиагностики может оказаться экономически затруднительным. Кроме того, разработанная схема пригодна для учебных лабораторий по автоматизации, диагностике и промышленному интернету вещей, поскольку сочетает измерение, цифровую обработку и интерпретацию технического состояния в едином устройстве.

Заключение

Разработана структура системы мониторинга состояния промышленного оборудования на основе анализа вибраций с применением микроконтроллера ESP32 и акселерометрического датчика. Показано, что использование ограниченного набора временных и спектральных признаков позволяет реализовать локальную диагностику технического состояния вращающихся машин в режиме реального времени.

Предлагаемый подход соответствует современным задачам предиктивного обслуживания и может служить основой для создания недорогих распределенных систем контроля состояния оборудования. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением экспериментальной базы, статистической верификацией порогов срабатывания, а также с интеграцией многоканальной диагностики на основе вибрационных, температурных и электрических параметров.

Список литературы

1. Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. — СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. — 158 с.
2. Гетманов В. Г. Цифровая обработка сигналов : учебное пособие. — М.: НИЯУ МИФИ, 2010. — 248 с.
3. Русов В. А. Спектральная вибродиагностика. Выпуск 1. — Пермь: ООО «Вибро-Центр», 2012. — 176 с.
4. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. — М.: Наука, 1996. — 276 с.
5. ГОСТ Р ИСО 20816-1-2019. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования. — М.: Стандартиформ, 2019. — 35 с.
6. Костюков В. Н., Науменко А. П. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования : учебное пособие. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. — 108 с.
7. Randall R. B. Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications. — Wiley, 2011. — 316 p.
8. Maier A. et al. Edge Computing Based Condition Monitoring for Low-Cost Predictive Maintenance // 2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS). — 2019. — P. 421-427.
9. Биргер И. А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.
10. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. — М.: Мир, 1989. — 540 с.