

Тыщук А. Н.
студент группы ПС/м-24-1-о
Инженерный факультет ВТШ «СПИ»
Севастопольский государственный университет
г. Севастополь, Россия

БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ MEMS- АКСЕЛЕРОМЕТРА ADXL345

Электродвигатели являются одним из наиболее распространённых видов промышленного оборудования, на долю которого приходится более 40% всех отказов, связанных с деградацией механических узлов — подшипников, вала и корпуса [1]. Своевременный контроль вибрационных параметров позволяет перейти от планово-предупредительного к предиктивному обслуживанию, сокращая незапланированные простои и экономические потери. Актуальность разработки доступных систем непрерывного мониторинга определяется отсутствием на российском рынке компактных беспроводных решений стоимостью менее 5 000 рублей с функцией спектрального анализа вибрации в реальном времени.

Целью данной работы является разработка и экспериментальная проверка аппаратно-программного комплекса ASDEM (Accelerometer-based System for Diagnostics of Electric Motors) для диагностики и мониторинга вибрационных параметров электродвигателей, работающего в двух режимах: автономном беспроводном а так же расширенном с подключением к персональному компьютеру.

Разработанный комплекс включает микроконтроллер ESP8266 (тактовая частота 80–160 МГц, встроенный Wi-Fi 802.11 b/g/n), трёхосевой MEMS-акселерометр ADXL345, датчик Холла KY-024 для бесконтактного измерения частоты вращения и силовой MOSFET - IRLZ44N для ШИМ-управления двигателем. На начальном этапе в качестве вибродатчика использовался модуль MPU-6050, однако в ходе экспериментальной деятельности выявлены его принципиальные ограничения для необходимой диагностики. Сравнительный анализ характеристик датчиков приведён в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение характеристик акселерометров MPU-6050 и ADXL345

Параметр	MPU-6050 (акселерометр)	ADXL345	Преимущество ADXL345
Макс. выходная частота	до 1000 Гц	до 3200 Гц	в 3,2× выше → полоса 1600 Гц
Встроенный FIFO-буфер	нет	32 отсчёта × 3 оси	снижает нагрузку на МК
Ток в режиме измерений	~3800 мкА	~140 мкА	в 27× меньше → автономность
Шум (спектральная плотность)	~400 мкг/√Гц	~250 мкг/√Гц	на 37% ниже → точнее
Гироскопические каналы	есть (не используются)	нет	нет избыточной периферии
Разрядность АЦП (акс.)	16 бит	10–13 бит (FULL_RES)	3,9 мг/МЗР — достаточно для вибро
Интерфейс данных	I ² C	I ² C / SPI	гибкость подключения

Датчик ADXL345 работает в режиме полного разрешения ($FULL_RES = 1$) с диапазоном ± 16 g, что обеспечивает шаг квантования 3.9 мг/МЗР — на два порядка меньше типичных вибрационных уровней диагностируемых двигателей. Частота дискретизации установлена 400 Гц через FIFO-буфер (код регистра $BW_RATE = 0x0C$), что соответствует частоте Найквиста 200 Гц и охватывает диапазон диагностических частот BPFO, BPFI, BSF и FTF подшипниковых узлов при оборотах до 3000 об/мин [2].

Частота вращения вала измеряется датчиком Холла KY-024 методом подсчёта импульсов в прерывании (IRAM_ATTR) по формуле $n = N / (N_m \cdot t) \cdot 60$ об/мин, где $N_m = 1$ — число магнитов на валу. Обработчик прерывания размещён в оперативной памяти, что исключает потери импульсов при любой загрузке основного цикла. Отфильтрованное значение рассчитывается по алгоритму экспоненциального сглаживания: $n_{\text{фильт}} = 0,3 \cdot n_{\text{нов}} + 0,7 \cdot n_{\text{фильт-1}}$.

Среднеквадратичное значение виброускорения вычисляется на скользящем окне $N = 100$ отсчётов с вычитанием постоянной составляющей: $a_{RMS} = \sqrt{(1/N \cdot \sum (a_i - \bar{a})^2)}$, г. Данный подход исключает влияние проекции ускорения свободного падения на результат и обеспечивает сопоставимость с нормативными порогами ГОСТ ИСО 10816-1 [3].

В автономном режиме ESP8266 функционирует как точка доступа Wi-Fi (SoftAP, адрес 192.168.4.1) с HTTP-сервером, предоставляющим веб-интерфейс с динамически обновляемыми графиками RMS по трём осям, тренда оборотов и журнала событий. В режиме расширенной диагностики данные передаются по UART-USB в компьютерное приложение ASDEM_PC (Python, PyQt5, pyqtgraph), которое строит амплитудный спектр методом БПФ, рассчитывает диагностические частоты подшипников и формирует текстовое заключение с рекомендациями по техническому обслуживанию.

Экспериментальная проверка проводилась на лабораторном макете с двигателем постоянного тока 12 В. В нормальном режиме при 1500 об/мин RMS X составил 0,008–0,015 г (зона А по ГОСТ ИСО 10816-1). При искусственно введённом дисбалансе ротора значение возросло до 0,042–0,078 г (в 3–5 раз), что уверенно детектировалось системой. Задержка обновления данных в веб-интерфейсе не превысила 450 мс, в приложении ASDEM_PC — 60 мс при частоте опроса 50 Гц.

Таким образом, в разработанном комплексе ASDEM реализуется принцип комплексной вибродиагностики, при которой частота вращения, измеряемая датчиком Холла, является опорным параметром для расчёта диагностических частот и нормализации спектра. При стоимости компонентов менее 1 000 рублей система обеспечивает функциональность, достаточную для выявления основных неисправностей электродвигателей: дисбаланса ротора, несоосности валов, ослабления крепления, дефектов подшипников, износа щёток и межвиткового замыкания обмотки.

Список литературы

1. Nandi S., Toliyat H.A., Li X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors — a review // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2005. — Vol. 20, № 4. — P. 719–729.
2. Analog Devices. ADXL345 3-Axis, ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g Digital Accelerometer: Data Sheet. — Wilmington: Analog Devices, 2015. — 36 p. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.pdf> (дата обращения: 15.01.2025).
3. ГОСТ ИСО 10816-1–97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования. — М.: Стандартиформ, 1997. — 16 с.
4. ISO 15243:2017. Rolling bearings — Damage and failures — Terms, characteristics and causes. — Geneva: ISO, 2017. — 52 p.
5. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2000. — 169 с.
6. InvenSense Inc. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4. — San Jose: InvenSense, 2013. — 52 p. URL: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf> (дата обращения: 15.01.2025).