



ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ВИБРАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В РЕЖИМЕ ПУСКА

Деркачёв С.В., Сидоров В.А.

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Россия

sergey_derkachev@mail.ru

Резюме: Развитие промышленного оборудования во многом обеспечивается использованием электромеханических систем, включающих приводной элемент – асинхронный двигатель. Техническое состояние электромеханической системы обеспечивает непрерывность и эффективность технологического процесса, что определяет актуальность применения различных методов диагностирования в практике эксплуатации. Проведенный краткий литературный обзор исследований в данном направлении указывает на общую тенденцию использования визуализации акустико-вибрационных сигналов, наряду с методами термографии для широкого применения. Известным фактом является то, что для диагностирования фактического состояния электромеханической системы высокой информативностью обладают переходные процессы. В проведенном исследовании оценка состояния проводилась на основе фиксации временных реализаций виброускорения в период запуска электромеханической системы (вентиляторного типа) в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, что было реализовано с помощью прикладных программ к смартфону. В результате сформулированы основные признаки проявления неисправностей электрической и механической частей электромеханической системы при измерении виброускорения на корпусе электродвигателя – приводного элемента в режиме пуска, возникающие при этом сложности в формализации временных реализаций компенсируются пониманием физических процессов, сопровождающих процесс пуска, а также формированием справочника проявления признаков неисправностей. Полученные результаты использовались для принятия решений о целесообразности проведения ремонтных работ и показали достаточную точность безразборного диагностирования указанным методом при использовании относительной и взаимной оценки.

Ключевые слова: электромеханическая система; диагностирование; временная реализация; виброускорение; оценка состояния; переходный процесс.

Благодарности: Результаты работы, представленные в статье, получены в ходе выполнения НИР в рамках Госзадания (FRRF-2024-0011).

Для цитирования: Деркачёв С.В., Сидоров В.А. Оценка технического состояния электромеханической системы на основе вибрационных показателей в режиме пуска // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 112-127. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-112-127.

ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF AN ELECTROMECHANICAL SYSTEM BASED ON VIBRATION INDICATORS IN START-UP MODE

Derkachev S.V., Sidorov V.A.

Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia

sergey_derkachev@mail.ru

Abstract: Object: This research aims to develop and validate a practical, low-cost methodology for the prompt technical condition assessment of electromechanical systems (EMS) during the startup transient. The primary goal is to enable binary classification ("satisfactory" or "unsatisfactory") of an EMS's state using vibration signals acquired solely via a smartphone's built-in accelerometer, facilitating widespread on-site screening without

specialized equipment. Methods: The diagnostic approach is based on recording triaxial vibration acceleration time histories during the startup of industrial asynchronous motors driving screw compressors and exhaust fans. Using a dedicated mobile application (AccelerometerMeter), measurements were taken in three orthogonal directions (axial, horizontal, vertical) relative to the motor housing. The methodology relies on relative and mutual comparison of the recorded signals, focusing on transient characteristics rather than absolute metric values. Results were benchmarked against conventional vibration analysis conducted with professional equipment according to ISO standards and post-maintenance teardown inspections. Results: The analysis of startup vibration patterns successfully identified distinctive fault signatures. Key diagnostic indicators included anomalous peak amplitudes, sustained instability, and the presence of characteristic beats and shock impulses, particularly during star-delta switching. Empirical correlations were established between the spatial dominance of vibration (e.g., predominant axial vibration indicating misalignment, high vertical components suggesting foundation issues) and specific mechanical or electromagnetic faults. The smartphone-based method effectively differentiated between properly functioning systems and those with confirmed defects, such as bearing degradation or rotor imbalance, with conclusions corroborated by standard vibration severity assessments. Conclusions: Utilizing a smartphone for vibration analysis during the startup transient proves to be a highly effective and accessible tool for preliminary condition monitoring and screening of electromechanical assets. It provides a viable means for early fault detection in field conditions, allowing maintenance personnel to prioritize equipment for further detailed investigation using advanced diagnostic techniques. The study confirms the high informational content of transient processes for diagnostics and establishes a foundation for a structured, two-level monitoring strategy: initial rapid screening with mobile devices followed by targeted expert analysis, thereby optimizing maintenance resources and enhancing operational reliability.

Keywords: *electromechanical systems; condition monitoring; vibration analysis; startup transient; smartphone diagnostics; predictive maintenance.*

Acknowledgments: *The results of the work presented in the article were obtained during the implementation of research in the framework of the State Assignment (FRRF-2024-0011)*

For citation: Derkachev S.V., Sidorov V.A. Assessment of the technical condition of an electromechanical system based on vibration indicators in start-up mode. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 112-127. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-112-127.

Введение (Introduction)

Практически вся современная промышленность базируется на использовании электромеханических систем, безотказность которых во многом определяет показатели надежности всей системы. Наиболее распространённым вариантом реализации электромеханической системы является сочетание асинхронного или синхронного электродвигателя, выполняющего роль привода и соединённого с ним через соединительную муфту исполнительного механизма (компрессора, центробежного насоса, вентилятора, дымососа и др.). Согласование частот вращения и крутящего момента приводного двигателя и исполнительного механизма осуществляется при помощи редуктора. Основное конструкторское решение – двухопорный вал с консольным или межопорным расположением рабочего элемента.

Оценка состояния электромеханической системы, работающей в длительном режиме проводится по результатам измерения вибрационных показателей, для локализации места повреждения, измерения температуры узлов и анализу тока статора. Вопросы использования различных диагностических методов рассмотрены в ряде статей.

Для определения обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя используется: регрессионный анализ модуля результирующего вектора тока статора [1], разработка алгоритмов, основанных на различных подходах к обработке сигналов [2], сигнатуры дефектов извлекаемые из сигнала тока в соответствии с уровнем нагрузки, количеством повторов, амплитудой сигнала [3], спектральное вычитание токового сигнала [4]. Возникновение повреждений

подшипникового узла предлагается диагностировать по прямому спектру потребляемого тока [5], инклюзивная диагностика повреждений по частотным составляющим боковых полос тока нагрузки [6]. Измерение и анализ вибрационных показателей позволяет уверенно диагностировать перемещения ротора относительно статора и определять развитие короткого замыкания витков обмотки статора [7], возникновение межвитковых витковых замыканий сочетая разложение вейвлет-пакетов и статистический корреляционный анализ [8]. Особое внимание уделяется изучению причин повышенной вибрации: дисбаланс, износ подшипников, кавитация и др. на основе комплексного подхода, включая спектральный анализ в расширенном частотном и динамическом диапазоне, анализ огибающей исходного сигнала виброускорения [9]. Одно из направлений в диагностировании электромеханического оборудования в нефтегазовой отрасли - мониторинг механических вибраций и параметров шума [10].

В работе [11] указывается, что анализ сигналов вибрации требует экспертных знаний, предлагается использовать много осевые статистические характеристики, алгоритмы машинного обучения, метод К-ближайших соседей и деревья решений для построения модели. В статье [12] рассматривается применение анализа акустических сигналов для обнаружения неисправностей подшипников, статора и ротора. Обсуждаются методы анализа во временной и частотной областях и признаки, полученные из необработанных акустических данных. Исследования [13] основанные на методах машинного обучения применяют метод классификации, преобразуя одномерные звуковые сигналы подшипников в двумерные скалограммы для трансферного обучения с предварительно обученной моделью. Визуализации звуковых сигналов [14], используется моделями классификации изображений для обнаружения неисправностей в электрических машинах и приводах.

Методология инфракрасной термографии [15] обеспечивает данные для анализа неисправностей трех состояний: двух, полутора уровней неисправности сломанного стержня ротора в асинхронном двигателе. В исследовании [16] предлагается использовать двумерные самоорганизующиеся операционные нейронные сети для диагностики несоосности и неисправностей ротора по тепловизионным изображениям асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Опубликован ряд работ, в которых мониторинг состояния двигателей и механизмов, выполняется путем обработки вибрационных показателей (виброускорения), полученных с помощью смартфона. В статье [17] представлена методика, использующая быстрое преобразование Фурье для определения составляющих компонентов вибрационного сигнала и сравнения их с информативными частотами возможных повреждений. Смартфон, в данном случае, выполняет роль сборщика данных, а компьютерная программа, использующая алгоритм нечеткой логики – роль экспертной системы.

В статье [18] предложено использование смартфона *Android* для сбора первичных данных о вибрации, которые затем передаются для обработки и визуализации в серии панелей управления, что позволяет в реальном времени отслеживать состояние оборудования, используя быстрое преобразование Фурье для идентификации источника максимального вибрационного сигнала.

Проведенные краткий обзор методов, используемых для обнаружения неисправностей асинхронного двигателя как приводного элемента электромеханической системы, указывает на тенденцию использования визуализации акустико-вибрационных сигналов, наряду с методами термографии для широкого практического применения. Следовательно, исследования в данном направлении обладают актуальностью на современном технологическом уровне знаний в области диагностирования.

Известным фактом является то, что для диагностирования фактического состояния электромеханической системы высокой информативностью обладают именно переходные процессы, даже относительно такого инертного показателя как температура. Одним из таких переходных процессов, представляющим интерес для диагностики, является режим пуска электромеханической системы, однако его кратковременность ограничивает возможности проведения спектрального анализа токовых характеристик, поскольку это требует использования специальной аппаратуры и более длительного интервала измерений, анализа характера шума, поскольку его восприятие является всегда субъективным, измерений общего уровня вибраций с последующим его спектральным анализом, поскольку время обработки исходных данных ограничивается временем пуска электромеханической системы.

Использование метода быстрого преобразования Фурье, получившего наибольшую популярность при обработке вибрационного сигнала, требует проведения усреднения, что исключает обнаружение случайных, непериодических, ударных реализаций,

предшествующих появлению симптомов развитого повреждения. Для условий длительного режима работы данный недостаток компенсируется квалификацией специалистов и временем развития повреждений. В практике эксплуатации электромеханических систем оценка состояния на уровне «удовлетворительно» и «неудовлетворительно», имея объективные показатели вибрационного сигнала становится основанием для оперативного принятия решения наряду с использованием субъективных методов диагностирования. Это определяет актуальность задачи анализа временного сигнала виброускорения при реализации быстропротекающих процессов запуска без применения сложных алгоритмов обработки данных, это определяет первый уровень анализа вибрации, при постановке диагноза.

Исходя из вышесказанного целесообразно представляется фиксация временных реализаций виброускорения в режиме пуска электромеханической системы в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. В режиме эксплуатации установка специальных датчиков на корпус элементов электромеханической системы или в цепи управления будет реализована после перехода на полную цифровизацию, что потребует некоторого промежутка времени. В этом случае фиксация временных реализаций виброускорения может быть реализована с помощью смартфонов с приложением *AccelerometerMeter*, которое позволяют выполнить измерение виброускорения электромеханической системы в режиме пуска благодаря встроенным акселерометрам, что позволяет получить реальную картину изменения виброускорения в трёх взаимно перпендикулярных плоскостях.

В производственных условиях эксплуатации электромеханических систем целесообразно использовать метод относительной оценки, ориентируясь на индикаторные возможности акселерометра, встроенного в смартфон, поэтому цель исследования заключается в разработке и экспериментальной верификации методики экспресс-оценки технического состояния электромеханической системы на основе анализа временных реализаций виброускорения, регистрируемых в переходном режиме пуска. В отличие от традиционных подходов, требующих применения специализированной виброизмерительной аппаратуры и спектрального анализа в установившихся режимах, предлагаемая методика ориентирована на решение бинарной задачи классификации («удовлетворительно» / «неудовлетворительно») с использованием индикаторных возможностей встроенного акселерометра мобильного устройства. Такой подход позволяет минимизировать количество точек контроля, сократить время принятия решения и реализовать двухуровневую систему мониторинга: оперативный скрининг с последующим углубленным приборным диагностированием.

Научная значимость исследования состоит в установлении и систематизации диагностических признаков проявления неисправностей электрической и механической частей электромеханической системы, выявляемых непосредственно по временным реализациям виброускорения в пусковом режиме без применения процедур частотного преобразования и усреднения сигнала. В отличие от известных работ, ориентированных на спектральный анализ установившихся режимов или применение сложных алгоритмов машинного обучения к акустико-вибрационным данным, в настоящем исследовании обоснована возможность использования трёх осевого акселерометра смартфона в качестве инструмента первичной диагностики при условии относительной и взаимной оценки измеренных сигналов

Практическая значимость исследования заключается в том, чтобы в условиях эксплуатации с помощью программного приложения к смартфону выявить признаки неудовлетворительного состояния электромеханической системы для ее вывода из эксплуатации и дальнейшего безразборного диагностирования более точными методами включая методологию вибрационного анализа прямых спектров, огибающей, кепстров и др. Фиксация удовлетворительного состояния позволяет продолжить эксплуатацию электромеханической системы с неизменным графиком технического обслуживания.

Материалы и методы (Materials and methods)

Экспериментальная верификация методики экспресс-оценки технического состояния электромеханической системы на основе анализа временных реализаций виброускорения выполнена на трех типах промышленных систем, которые отличаются между собой мощностью, частотой вращения и конструкцией. В качестве таких энерготехнических систем был выбран винтовой компрессор SAB-163, приводом которого является асинхронный электродвигатель мощностью 200 кВт и частотой вращения 2975 об/мин, дымососы ДН-21ГМ (ДН-3 и ДН-4) с приводными асинхронными электродвигателями мощностью 90 кВт и частотой вращения 590 об/мин, дымосос ДН-15 с приводным асинхронным электродвигателем мощностью 75 кВт и частотой вращения 1499 об/мин. Пуска компрессора SAB-163 осуществляется с переключением соединения обмоток статора со схемы «звезда» на схему «треугольник» с выдержкой по времени равной 12 секунд, пуск дымососа выполняется по схеме

прямого пуска без переключения схемы.

Выбор приведенных объектов диагностирования обусловлен необходимостью проведения апробации предложенной методики диагностирования на оборудовании с заведомо известным техническим состоянием, подтвержденным традиционными методами вибродиагностики и последующими визуальными осмотрами.

Осуществлять контроль состояния электромеханической системы в режиме пуска предлагается с помощью смартфона со встроенным акселерометром и мобильного приложения *AccelerometerMeter*, что позволит осуществить фиксацию показателей виброускорения по трем направлениям относительно корпуса электродвигателя (рис. 1): X – поперечное (горизонтальное); Y – продольное (осевое); Z – вертикальное. Сразу необходимо отметить, что предлагаемый метод диагностирования имеет строго индикаторный характер и может быть использован только для относительного, а не абсолютного сравнения с нормативными значениями виброускорения.



Рис. 1. Направления измерения вибрации относительно положения электродвигателя привода дымососа ДН-21ГМ *Fig. 1. Directions of vibration measurement relative to the position of the electric motor of the DN-21GM smoke pump drive*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Для реализации предлагаемого метода диагностирования с помощью смартфона для каждой энерготехнической системы выполнялось не менее 2 последовательных пусков без изменения положения смартфона, закрепленного в стандартной точке (проекция переднего подшипника на корпус), при этом контролировались жёсткость крепления и отсутствие люфта. Также для каждого типа электромеханической системы выполнялось 3–5 пусков на заведомо исправном оборудовании после капитального ремонта или по результатам приборной диагностики. Далее полученные временные реализации виброускорения по трём осям обрабатывались на компьютере.

Основным отличием предлагаемого метода диагностирования от приведенных в источниках [17, 18] методов является отказ от использования сложного спектрального анализа, а также проведение анализа именно временной реализации виброускорения в пусковом режиме. Такой подход обусловлен кратковременностью режима пуска, поскольку при малых интервалах измерений переходного процесса усреднение теряет информативность о возникающих случайных ударных импульсах.

Анализ полученных временных реализаций виброускорения выполняется поэтапно и для каждого из трех направлений (X, Y, Z) фиксируется отношение размахов виброускорения в установившемся режиме работы или непосредственно сразу после выхода на номинальную частоту вращения. В качестве контролируемых критериев выступают: максимальный размах виброускорения в каждом периоде, наличие или отсутствие хаотичных высокоамплитудных выбросов и форма возникающих колебаний. В процессе обработки результатов выполняется сравнение как абсолютных значений, так и соотношений между осями относительно эталона.

На основе обработки полученных экспериментальных данных для 15 единиц оборудования эмпирически установлены следующие пороговые значения: превышение максимального размаха виброускорения относительно эталона более чем на 50 %; появление хаотичных выбросов, отсутствовавших в эталоне; увеличение длительности пуска более чем на 20 %. Решение о состоянии электромеханической системы «неудовлетворительно» выносится в случае выполнения любого из приведенных условий. В противном случае состояние классифицируется как «удовлетворительно».

Результаты (Results)

Предварительный этап при проведении эксперимента включал наблюдение за состоянием подшипников двигателя компрессора SAB – 163 вибрационными методами в течение пяти лет. Основная цель – определение рационального времени замены подшипника с развитыми повреждениями без повреждения рядом расположенных

деталей была достигнута с использованием математического моделирования на основе фактических данных об уровне значений виброускорения. Наличие увеличенного радиального зазора в результате абразивного износа было подтверждено визуальным осмотром после разрезки наружного кольца снятого подшипника.

Перед заменой, подшипников двигателя, проведена фиксация временных реализаций виброускорения в режиме пуска винтового компрессора типа SAB-163. Запуск осуществлялся в штатном режиме в два этапа (рис. 2): на первом этапе при соединении обмоток статора приводного асинхронного электродвигателя по схеме «звезда», через 11 секунд происходило переключение на схему соединения обмоток статора в «треугольник». Для анализа определено наиболее информативное вертикальное направление (ось Z) - винтовой компрессор установлен на виброопорах.

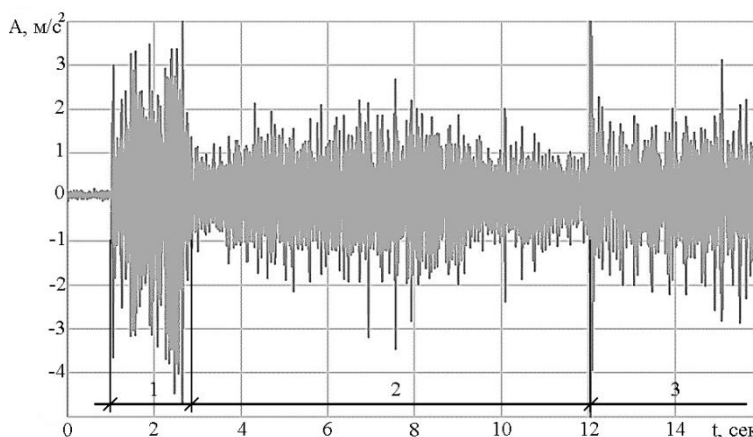


Рис. 2. Временные реализации виброускорения при запуске двигателя винтового компрессора SAB-163 при подшипниках, имеющих повреждения

Fig. 2. Temporary realization of vibration acceleration when starting the engine of the SAB-163 screw compressor with damaged bearings

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Достоинство временных реализаций – наглядность представления происходящих процессов, недостаток – сложность формализации изображения, что требует подготовки специалиста в области вибрационного анализа и динамики электрических машин. Для анализа выделены три периода: 1 – участок выхода на критическое скольжение; 2 – промежуточная работа по схеме «звезда»; 3 – длительная работа по схеме «треугольник». Фиксировались значения размаха виброускорения – минимальные и максимальные.

На рисунке 3 показано распределение выбранных периодов относительно механической характеристики асинхронного электродвигателя.

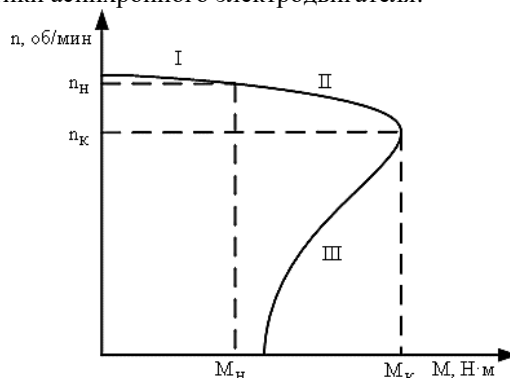


Рис.3. Распределение выбранных периодов относительно механической характеристики асинхронного электродвигателя

Fig.3. Distribution of the selected periods relative to the mechanical characteristics of an asynchronous electric motor

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В момент пуска асинхронного электропривода в течение 2,7 с реализуется период 1 нестабильных колебаний виброускорения, связанный одновременно с воздействием электромагнитных полей и зазоров в подшипниках. Максимальный размах колебаний достигает $9,0 \text{ м/с}^2$, минимальный – около $2,0 \text{ м/с}^2$.

При работе асинхронного электродвигателя в режиме пуска со схемой соединения обмоток статора «звезда» (период 2) во временной реализации виброускорения возникают

не стабильные, негармонические колебания с последовательным нарастанием (до $6,0 \text{ м/с}^2$) и постепенным снижением размаха (до $2,0 \text{ м/с}^2$). Преобладающей частотой является 100 Гц , периодически снижающаяся до 50 Гц при взаимодействии с негармоническими колебаниями подшипниковых частот. Как отмечалось уже ранее, в отличие от традиционных подходов, использующих быстрое преобразование Фурье [17, 18], в настоящей работе анализ выполняется непосредственно по временным реализациям без частотного преобразования.

Начало периода 3 начинается с переключения схемы соединения обмоток статора приводного асинхронного электродвигателя на «треугольник», что сопровождается динамическим ударом с размахом 10 м/с^2 . После перехода на схему соединения обмоток статора «треугольник» происходит снижение размаха колебаний до $3,0...4,0 \text{ м/с}^2$. Нестабильность колебаний, аналогична периоду 2, что подтверждает вывод о повреждениях подшипников.

Возникновение описанных симптомов характерно для возможных нарушений электромагнитных взаимодействий внутри асинхронного электродвигателя вследствие отклонений в кинематике и форме тел качения подшипника типа 6314. В результате проведенного анализа было принято решение о замене подшипников, что должно привести к снижению воздействия дополнительно возникающих сил.

Визуальный осмотр подшипника 6314 после разбора асинхронного электродвигателя позволил выявить причину возникновения повышенных значений виброускорения, которая заключается в наличии окисленной смазки, её коксовании при длительной остановке и нарушении режима смазывания, что выразилось в отсутствии отвода продуктов износа из зоны трения и последующего абразивного износа. Дополнительным фактором, влияющим на выход из строя подшипника, является отсутствие отверстий для выхода отработанной смазки, которые не были предусмотрены в конструкции подшипниковых узлов электродвигателя.

На рисунке 4 приведены результаты фиксации временных реализаций виброускорения в режиме пуска винтового компрессора типа SAB-163 после замены подшипников. Временные значения периодов остались без изменений.

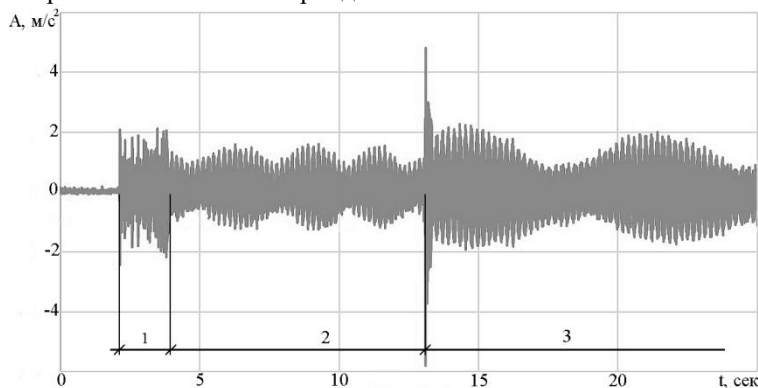


Рис. 4. Временные реализации виброускорения при запуске двигателя винтового компрессора SAB-163 после замены подшипников

Fig. 4. Temporary realization of vibration acceleration when starting the engine of the SAB-163 screw compressor after replacing bearings

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунках 5–7 приведены масштабированные временные реализации виброускорения при запуске двигателя винтового компрессора SAB-163 после замены подшипников по трем периодам соответственно.

Отметим произошедшие изменения. Максимальный размах на периоде 1 (рис. 5) снизился до $4,2 \text{ м/с}^2$, на периоде 2 (рис.6) – до $1,0...3,0 \text{ м/с}^2$, на периоде 3 (рис. 7) - до $2,0...4,0 \text{ м/с}^2$. Неизменным остался размах колебаний в момент переключения схемы обмоток статора асинхронного электродвигателя в режиме пуска со схемы «звезда» на «треугольник» - 10 м/с^2 , что обусловлено электромагнитным взаимодействием магнитных полей статора и ротора. Время выхода в номинальный режим работы составило $2,7 \text{ с}$, что практически соответствует расчётному. На периодах 2 и 3 четко проявились гармонические колебания, связанные с оборотной частотой вращения ротора и возникновение биений, вызванных наличием двух источников гармонических колебаний с разностью частот 5 Гц . Стабильность колебаний на периодах 2 и 3, снижение уровня размаха виброускорения свидетельствует об удовлетворительном состоянии подшипников и правильности принятого решения.

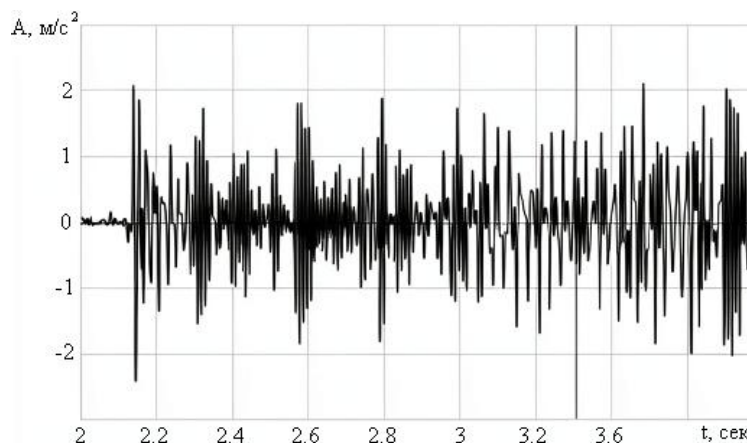


Рис. 5. Временные реализации виброускорения при запуске двигателя винтового компрессора SAB-163 после замены подшипников на участке выхода на критическое скольжение (период 1)
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 5. Temporary realization of vibration acceleration when starting the engine of the SAB-163 screw compressor after replacing bearings at the critical slip exit site (period 1)
Source: compiled by the author.

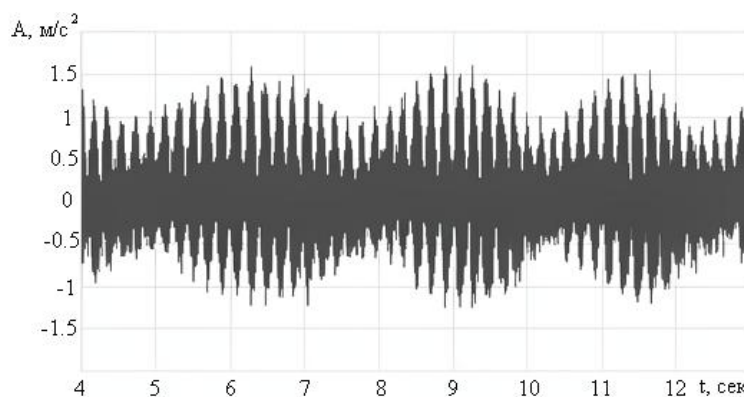


Рис. 6. Временные реализации виброускорения при запуске двигателя винтового компрессора SAB-163 после замены подшипников при работе по схеме «звезда» (период 2)
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 6. Temporary realization of vibration acceleration when starting the engine of the SAB-163 screw compressor after replacing bearings during operation according to the "star" scheme (period 2)
Source: compiled by the author.

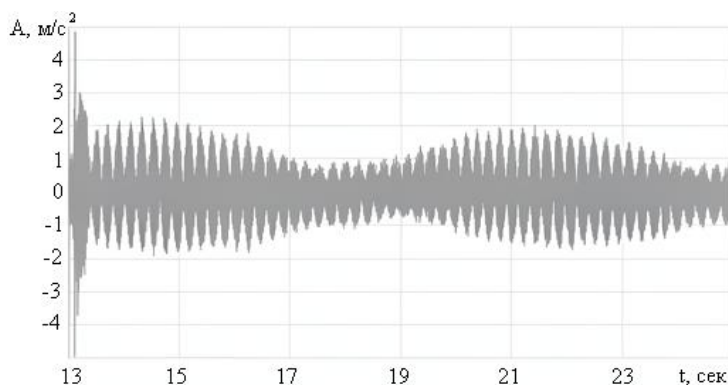


Рис. 7. Временные реализации виброускорения при запуске двигателя винтового компрессора SAB-163 после замены подшипников при работе по схеме «треугольник» (период 3)
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 7. Temporary realization of vibration acceleration when starting the engine of the SAB-163 screw compressor after replacing bearings when working according to the "triangle" scheme (period 3)
Source: compiled by the author.

На втором этапе исследований проведена относительная оценка состояния двух полностью идентичных по конструкции, но различных по техническому состоянию, дымососов ДН-21ГМ - ДН-3 и ДН4 приводом которых являются асинхронные электродвигатели мощность 90 кВт с частотами вращения роторов равными 590 об/мин по результатам временной реализации виброускорения при пуске. Конструкция дымососа включает приводной двигатель, соединительную упруго-втулочную муфту, вал дымососа на подшипниках качения, установленных в отдельном корпусе с консольным расположением

рабочего колеса. Дымососы установлены на жёстком фундаменте. Фактическое состояние дымососов определено предварительно по результатам измерения параметров вибрации.

Измерения среднеквадратичного значения виброскорости в частотном диапазоне 10...1000 Гц проводились при работе оборудования в длительном режиме. Точки контроля: точка 1 – свободный подшипник двигателя; точка 2 – подшипник двигателя со стороны муфты; точка 3 – подшипник промежуточного вала со стороны муфты; точка 4 – подшипник промежуточного вала со стороны рабочего колеса.

Для подтверждения достоверности предлагаемой методики выполнено сопоставление полученных результатов вибродиагностики с помощью смартфона и с помощью анализатора спектра вибраций 795М.

Вибрационное обследование выполнено в полном соответствии с действующей нормативной базой: ГОСТ 24346-80. «Вибрация. Термины и определения»; ГОСТ ИСО 5348-2002. «Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров»; ГОСТ ИСО 20816-3-2023. «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на не вращающихся частях».

Оценка технического состояния электромеханической системы проводилась путём измерения уровня вибрации и сравнения с нормативными значениями, которые регламентированы ГОСТ Р ИСО 20816-1-2021 «Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния машин. Часть 1. Общее руководство» и ГОСТ I EC 60034-14-2014 «Машины электрические вращающиеся. Часть 14. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотами вала 56 мм и более. Измерения, оценка и пределы жесткости вибраций». Значения виброскорости, определяющие границы состояний составляют: до 4,5 мм/с – функционирование без ограничения сроков; 4,5...7,1 мм/с – функционирование в ограниченном периоде времени; свыше 7,1 мм/с – возможны повреждения машины. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Значения параметров вибрации для контрольных точек дымососов
Vibration parameter values for smoke extraction control points

Точка измерения	Среднеквадратичное значение виброскорости (мм/с), для направлений измерения, частотный диапазон 2...200 Гц		
	Вертикальное	Горизонтальное	Осевое
Дымосос ДН-3			
1	3,0	7,0	-
2	2,9	6,4	3,3
3	3,4	10,5	9,0
4	11,7	8,3	16,1
Дымосос ДН-4			
1	1,5	1,8	-
2	1,3	1,7	1,2
3	1,6	1,7	1,5
4	1,6	1,5	1,4

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основании полученных данных установлен диагноз относительно категорий технического состояния. Дымосос ДН-3 - возможны повреждения машины, эксплуатация не рекомендуется. Дымосос ДН-4 - функционирование без ограничения сроков. Во всех случаях классификация «удовлетворительно» / «неудовлетворительно», полученная по предлагаемой методике, совпала с выводами инструментального контроля.

Диагноз, поставленный относительно технического состояния электромеханической системы дымососов в целом, распространяется на их компоненты, в частности двигателя. Состояние приводного двигателя дымососа ДН-3 – «неудовлетворительное», двигателя привода дымососа ДН-4 – «удовлетворительное».

На рис. 8 приведены результаты фиксации временных реализаций виброускорения пуска двух аналогичных дымососов. Одинаковые массогабаритные и силовые параметры, установка дымососов на жестких фундаментах, аналогичные системы управления дают повод использовать метод относительного сравнения при оценке технического состояния. Пример сравнительной оценки и формирования диагностических симптомов показан относительно вертикального направления (ось Z).

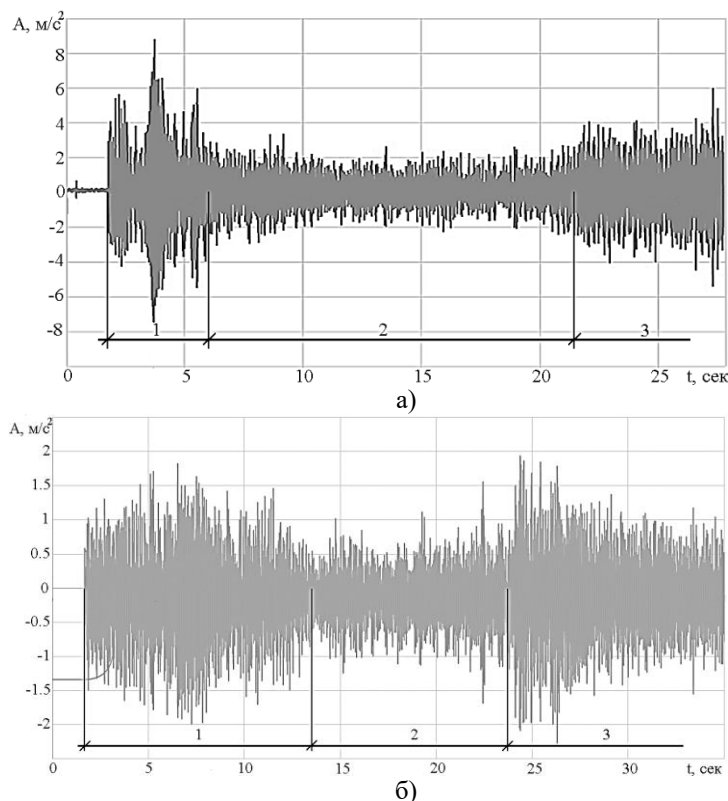


Рис. 8. Временные реализации виброускорения при запуске двигателей дымососов; а) ДН-3; б) ДН-4

Source: compiled by the author.

Выбранный для анализа участок выхода на стабильный режим работы был разбит на три периода, одинаковых по функциональному назначению, но различных по индивидуальной реализации.

Период первый – зона нестабильных взаимодействий – фактически это время выхода частоты вращения двигателя на $\omega_k (S_{ke})$. Практически невозможно выделить постепенное увеличение частоты вращения. Ротор разгоняется практически мгновенно. При этом взаимодействие электромагнитных полей с ротором и подшипниками преобразуется в различные конкретные реализации, отличающиеся временем, амплитудой и наличием динамических процессов (ударов). Запуск дымососа ДН-3 сопровождается тремя динамическими взаимодействиями, причины которых могут быть связаны с наличием зазоров и повышенной податливости в соединении статор-корпус.

Период второй – выход на номинальную частоту вращения, отслеживается по изменению периода оборотной частоты. В данном случае характеризуется снижением значений размаха вибрационных колебаний. Размах виброускорения на данном периоде ниже у дымососа ДН-4, что подтверждает ранее поставленный диагноз об «удовлетворительном» состоянии. Однако, отсутствуют четко выраженные гармонические колебания – проявление повреждений подшипниковых узлов.

Период третий – возникновение крутильных колебаний в зоне рабочих нагрузок при снижении инерционных сил при разгоне. Проявление торсионного эффекта определяется наличием зазоров в соединительной муфте, состоянием упругих элементов, соосностью валов двигателя и дымососа, степенью затяжки резьбовых соединений, податливостью основания и др. Далее вибрационный процесс может стабилизироваться или нарастать (как будет показано далее).

Выделение указанных диагностических симптомов позволяет обслуживающему персоналу, без загрузки данных в компьютер, непосредственно с экрана смартфона принять решение о продолжении эксплуатации, вызова диагностов для проведения приборного вибрационного контроля и постановке точного диагноза или необходимости срочной остановки механизма. Введение промежуточного уровня контроля расширяет количество объектов, по которым оценивается техническое состояние, повышается стабильность работы оборудования за счет своевременного проведения технического обслуживания и ремонта.

Третий этап исследований позволил установить некоторые особенности запуска приводного электродвигателя с частотой вращения 1499 об/мин и мощностью 75 кВт

дымососа ДН-15. Еще одним диагностическим параметром состояния электромеханических систем может служить время выхода системы в номинальный режим. В данном случае соотношение моментов инерции ротора двигателя и рабочего колеса дымососа и система управления реализуют длительный запуск. Как правило значения электромагнитного момента приводного электродвигателя и момент сопротивления приводимого механизма являются неизвестными, однако известно, что длительность времени пуска увеличивается при более высоких значениях момента сопротивления механизма и электромагнитного момента электродвигателя. На рис. 9 приведены результаты фиксации временных реализаций виброускорения в режиме пуска дымососа ДН-15.

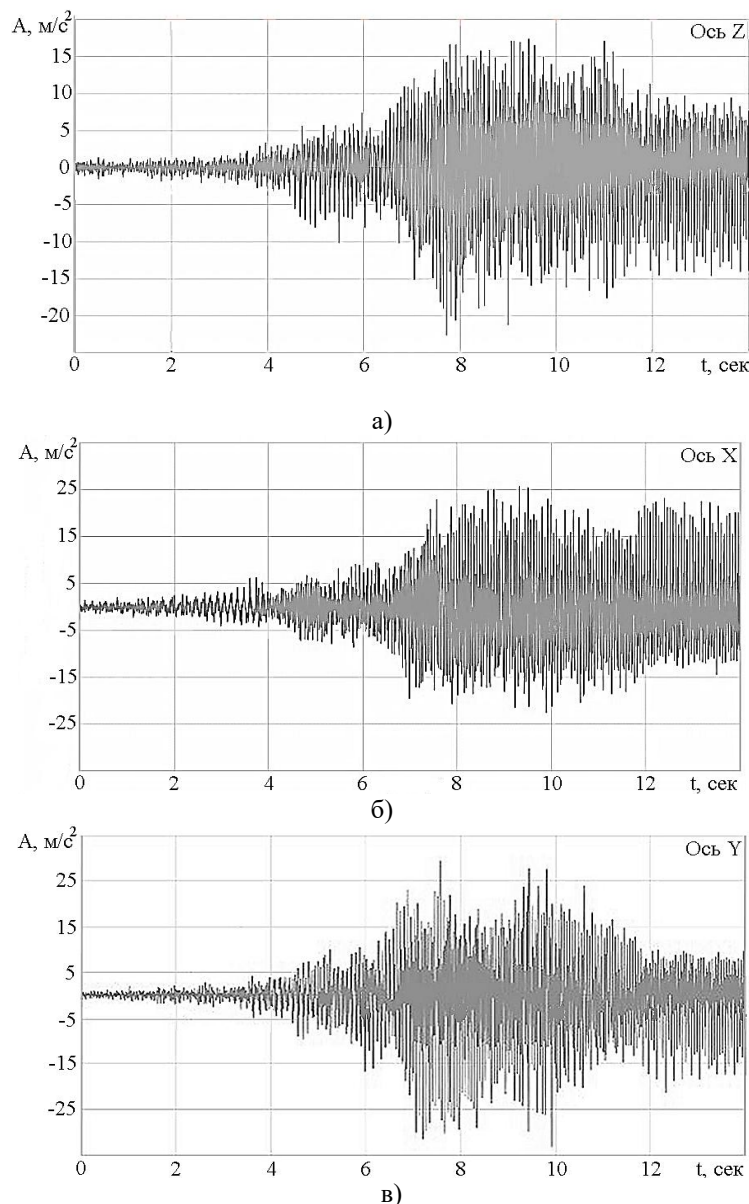


Рис. 9. Временные реализации виброускорения по трем осям в режиме пуска электродвигателя привода дымососа ДН-15: а) вертикальной – ось Z; б) горизонтальной (поперечной) – ось X; в) осевой – ось Y

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из временных реализаций виброускорения в режиме пуска электродвигателя привода дымососа ДН-15, приведенных на рис. 9 длительность пуска составила 11 секунд, в момент выхода в номинальный режим дымососа характеризуется стабилизацией значений размаха виброускорения на достаточно высоком уровне, равном 40 м/с^2 . Неудовлетворительное состояние подтверждается нестабильностью размаха виброускорения по осям измерений. В данном случае причиной возникновения таких значений размаха виброускорения является податливое основание и дисбаланс рабочего колеса.

Несмотря на общие временные закономерности пуска, каждое из направлений имеет индивидуальные особенности, проявляющиеся в амплитудном значении максимального размаха виброускорения и тенденции после выхода на номинальный режим. В данном случае повышенные значения в вертикальном и осевом направлениях объясняется установкой дымососа на виброопорах с различной жесткостью, что является основной причиной неудовлетворительного состояния и вывода дымососа из эксплуатации.

Различия в реализациях сигнала виброускорения в трёх взаимно перпендикулярных направлениях позволяет сформулировать диагностические правила на основе анализа классической математической модели колебательного процесса:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + cx = F,$$

где m – масса; \ddot{x} – ускорение; \dot{x} – скорость; x – перемещение; h – коэффициент демпфирования; c – жёсткость; F – действующая сила.

Преобладание значений в продольном (горизонтальном) направлении – ось X указывает на ослабление резьбовых соединений, поскольку происходит снижение жесткости c или увеличение силы F в этом направлении. Практически аналогичные значения в вертикальном направлении – ось Z , являются следствием податливого основания. Значения в осевом направлении - ось Y увеличиваются при отклонениях в соосности валов двигателя и дымососа. Результаты фиксации временных реализаций виброускорения в режиме пуска дымососа ДН-3, показывают, что происходит увеличение значения размаха виброускорения после выхода в номинальный режим, в осевом и вертикальном направлениях, что позволяет сделать обоснованный вывод о неудовлетворительном состоянии дымососа ДН-3.

Из результатов фиксации временных реализаций виброускорения в режиме пуска дымососа ДН-4, видно, что величина размаха виброускорения составила не более 4 м/с^2 и стабилизация показателей после выхода в рабочий указывает на удовлетворительное состояние дымососа ДН-4.

Сравнение результатов, приведенных на рис. 8, позволяет проследить изменения между электромагнитным моментом электродвигателя и моментом сопротивления. Нестабильность электромагнитного момента электродвигателя определяется механической характеристикой и зависит от частоты вращения, которую определить не удалось из-за наличия дополнительных возмущений, частоты сети, подшипников качения, состояния исполнительного механизма и др. Различия между вибрацией электродвигателя, работающего самостоятельно и после присоединения исполнительного механизма позволяют оценить уровень дополнительных сил, действующих на элементы

Одним из признаков появления отклонений в работе механической системы асинхронного двигателя становится режим биений, приведенный на рисунке 10.

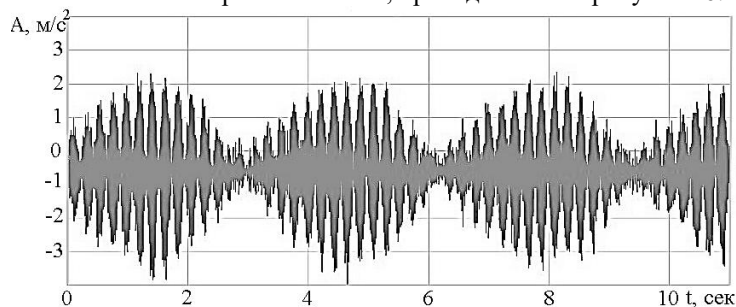


Рис. 10. Временные реализации виброускорения при возникновении биений *Fig. 10. Temporary realization of vibration acceleration in case of beats*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Данный режим зафиксирован на асинхронном двигателе мощностью 300 кВт и частотой вращения 2975 об/мин после 28 лет эксплуатации. Проявляется повреждение в виде колебаний с частотой 5 Гц (период 0,2 с) и биений с периодичностью 3 с. Это позволяет предположить наличие ослабления посадочных мест подшипников и нарушения равномерности воздушного зазора между статором и ротором.

Таким образом, начато формирование словаря дефектов для анализа временного сигнала виброускорения при пуске асинхронного электродвигателя. Использование данного словаря предполагается по двум направлениям: применение выделенных характерных признаков повреждений для фиксации их наличия с экрана смартфона; последующая обработка реализаций в цифровой модели развития повреждений на основе диагностического симптома, объединяющего действие электромагнитных полей и состояния механической системы.

В первом случае практическое внедрение реализовано за счет обучения эксплуатационного персонала по краткому курсу использования встроенного в смартфон

трех координатного акселерометра и распознавания проявления диагностических признаков повреждения во временном сигнале виброускорения.

Второй случай является одним из направлений дальнейших исследований на основе математической модели с коррекцией по фактическим результатам пуска электродвигателя.

Предложенный подход расширяет количество объектов с контролируемым техническим состоянием при минимальных затратах средств и ресурсов и уже доказал свою эффективность в практике эксплуатации дымососов и вентиляторов предприятий.

Выводы (Conclusions)

1. Экспериментально подтверждено, что режим пуска электромеханической системы является высокоинформативным для диагностирования её фактического технического состояния. Анализ временных реализаций виброускорения в режиме пуска позволяет выявить скрытые дефекты, которые в установившемся режиме могут маскироваться или проявляться с малой амплитудой. Установлены характерные диагностические признаки для дефектов механической (ослабление креплений, дисбаланс, износ подшипников) и электрической (нарушение электромагнитной симметрии) частей системы, проявляющиеся в изменении амплитудно-временных характеристик, появлении биений и ударных импульсов в специфических пространственных направлениях.

2. Разработан и апробирован методический подход для экспресс-оценки технического состояния электромеханического оборудования на основе индикаторных измерений встроенным акселерометром смартфона. Доказана возможность использования мобильного устройства в качестве доступного средства первичной диагностики для классификации состояния на уровне «удовлетворительно» и «неудовлетворительно». Научная новизна подхода заключается в обосновании минимально необходимой конфигурации контроля (три взаимно перпендикулярных направления) и разработке метода относительной и взаимной оценки сигналов, позволяющего использовать индикаторные показания встроенного акселерометра для первичной классификации технического состояния при условии предварительной калибровки по эталонному оборудованию.

3. Сформирован и верифицирован на реальных промышленных объектах набор диагностических признаков для интерпретации вибросигналов в режиме пуска, что составляет основу для создания экспертного справочника симптомов. Установлены корреляции между преобладанием виброускорения в определенном направлении (осевом, поперечном, вертикальном) и типом потенциального дефекта (несоосность, дисбаланс, податливость фундамента). Полученные результаты создают основу для формализации знаний и последующей разработки алгоритмов машинного обучения для автоматической классификации неисправностей.

Литература

1. Баннов Д. М. Метод диагностики обрывов стержней ротора в асинхронных электродвигателях на основе регрессионного анализа модуля результирующего вектора тока статора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. № 333(5). С.196-208.
2. Abdelhak G, Sid Ahmed B, Djekidel R. Fault diagnosis of induction motors rotor using current signature with different signal processing techniques.// Diagnostyka. 2022. Vol. 23(2). pp. 1 - 9.
3. Sudip Halder, Sunil Bhat, Daria Zychma, Pawel Sowa Broken Rotor Bar Fault Diagnosis Techniques Based on Motor Current Signature Analysis for Induction Motor—A Review.// Energies. 2022. Vol. 15. pp. 8569
4. Zafer Doğan Broken Rotor Bar Fault Detection in Induction Motor Based on Spectral Analysis // Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering. 2025. Vol.12(4). pp.357-363
5. Казыханов Р. Р. Повышение надежности методом диагностики подшипникового узла электрических машин по спектру потребляемого тока // Новая наука: от идеи к результату. 2025. № 5. С. 186-198.
6. K. Yatsugi, S. E. M. P. Kone and Y. Mizuno, "Faulty Class Diagnosis of Three Phase Induction Motor Bearing Using Stator Current Spectral Features and Machine Learning Algorithms," 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan. 2022. pp. 112-117.
7. Сафиуллин Р. А., Янгиров И. Ф. Исследование вибрации асинхронного электродвигателя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021.

Т. 17, № 2. С. 41-54.

8. M. Marczak, K. Górny and W. Pietrowski, "Wavelet Based Vibration Analysis for Detection of Inter-Turn Faults in Induction Motors Using Pearson Correlation," 2025 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA), Poznan. Poland. 2025. pp. 22-27.

9. Вибродиагностика насосного оборудования тепловых электростанций / А. В. Лукьянов, Д. П. Алейников, А. П. Хоменко, В. А. Налетов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 4(84). С. 103-116.

10. Цвяк В. А., Жманков В. М., Штельмашенко О. С Вибрационная диагностика подшипников и центробежного насоса нефтегазового оборудования// Результаты современных научных исследований и разработок: сборник статей XVII Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 17 июня 2022 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. С. 33-35.

11. E. Irgat, E. Çinar and A. Ünsal, "The detection of bearing faults for induction motors by using vibration signals and machine learning," 2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Dallas. TX. USA, 2021. pp. 447-453

12. N. Rajapaksha, S. Jayasinghe, H. Enshaei and N. Jayarathne, "Acoustic Analysis Based Condition Monitoring of Induction Motors: A Review," 2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC). Kigali. Rwanda. 2021. pp. 1-10.

13. E. M. Mahani, A. Mirabadi, A. Rezazadeh and A. H. Karamali, "Acoustic Fault Diagnosis of Rolling Bearings in Induction Motors Using Time-Frequency Image Analysis," 2024 4th International Conference on Electrical Machines and Drives (ICEMD), Tehran, Iran, Islamic Republic. 2024. pp. 1-6

14. N. Yordanov, M. Zhilevski and M. Mikhov, "Fault Detection in Electric Motors using Acoustic Signals and Image Classification," 2024 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova. Romania. 2024. pp. 1-6

15. E. Resendiz-Ochoa, J. M. Enriquez-Ugalde, J. J. Saucedo-Dorantes and L. A. Morales-Hernandez, "Broken Rotor Bar Failures Diagnosis with Supervised Learning and Infrared Thermography," 2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). Dallas. TX. USA. 2021. pp. 499-504.

16. S. Kilickaya, C. Celebioglu, L. Eren and M. Askar, "Thermal Image-Based Fault Diagnosis in Induction Machines via Self-Organized Operational Neural Networks," 2025 IEEE Symposium on Computational Intelligence on Engineering/Cyber Physical Systems (CIES), Trondheim, Norway. 2025. pp. 1-7.

17. Ali A., El-Serafi K., A. K. Mostafa S., El-Sheimy N. Frequency Features Based Fuzzy System for Rotating Machinery Vibration Analysis Using Smartphones Low-Cost MEMS Sensors. Journal of Sensor Technology. 2016. Vol. 6 (3).pp. 56-74.

18. Hafizh H., Ali M.N.N., Abdul Majeed A.P.P. Vibration Condition Monitoring of Rotating Machinery with IoT and Smartphone Sensors. In: Tan, A., et al. Advances in Intelligent Manufacturing and Robotics. ICIMR 2023. Lecture Notes in Networks and Systems. 2024. Vol 845. pp. 421-431.

Авторы публикации

Деркачёв Сергей Владимирович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник – руководитель молодежной научной лаборатории «Приборостроение и станкостроение» Донецкого национального технического университета. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-5801-7081>. *Email*: sergey_derkachev@mail.ru.

Сидоров Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Механическое оборудование заводов чёрной металлургии» Донецкого национального технического университета *ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-6794-7838>. *Email* sidorov_va58@mail.ru.

References

1. Bannov D. M. Metod diagnostiki obryvov sterzhnej rotora v asinxronny`x e`lektrodvigatelyax na osnove regressionnogo analiza modulya rezul'tiruyushhego vektora toka statora // Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2022. № 333(5). S.196-208 (In Russ).

2. Abdelhak G, Sid Ahmed B, Djekidel R. Fault diagnosis of induction motors rotor using current signature with different signal processing techniques.// *Diagnostyka*. 2022. Vol. 23(2). pp. 1 - 9.
3. Sudip Halder, Sunil Bhat, Daria Zychma, Pawel Sowa Broken Rotor Bar Fault Diagnosis Techniques Based on Motor Current Signature Analysis for Induction Motor—A Review.// *Energies*. 2022. Vol. 15. pp. 8569
4. Zafer Doğan Broken Rotor Bar Fault Detection in Induction Motor Based on Spectral Analysis // *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2025. Vol.12(4). pp.357-363
5. Kazy`xanov R. R. Povy`shenie nadezhnosti metodom diagnostiki podshipnikovogo uzla e`lektricheskix mashin po spektru potrebyaemogo toka // *Novaya nauka: ot idei k rezul'tatu*. 2025. № 5. S. 186-198 (In Russ).
6. K. Yatsugi, S. E. M. P. Kone and Y. Mizuno, "Faulty Class Diagnosis of Three Phase Induction Motor Bearing Using Stator Current Spectral Features and Machine Learning Algorithms," 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan. 2022. pp. 112-117.
7. Safiullin R. A., Yangirov I. F. Issledovanie vibracii asinxronnogo e`lektrovdigatelya // *E`lektrotexnicheskie i informacionny`e komplekсы` i sistemy`*. 2021. T. 17, № 2. S. 41-54 (In Russ).
8. M. Marczak, K. Górny and W. Pietrowski, "Wavelet Based Vibration Analysis for Detection of Inter-Turn Faults in Induction Motors Using Pearson Correlation," 2025 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA), Poznan. Poland. 2025. pp. 22-27.
9. Vibrodiagnostika nasosnogo oborudovaniya teplovy`x e`lektrostancij / A. V. Luk`yanov, D. P. Alejnikov, A. P. Xomenko, V. A. Naletov // *Sovremenny`e tekhnologii. Sistemny`j analiz. Modelirovanie*. 2024. № 4(84). S. 103-116 (In Russ).
10. Czvyak V. A., Zhmankov V. M., Shtel`mashenko O. S Vibracionnaya diagnostika podshipnikov i centrobezhnogo nasosa neftegazovogo oborudovaniya// *Rezul'taty` sovremenny`x nauchny`x issledovaniy i razrabotok : sbornik statej XVII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Penza, 17 iyunya 2022 goda. – Penza: Nauka i Prosveshhenie (IP Gulyaev G.Yu.)*, 2022. S. 33-35 (In Russ).
11. E. Irgat, E. Çınar and A. Ünsal, "The detection of bearing faults for induction motors by using vibration signals and machine learning," 2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Dallas. TX. USA, 2021. pp. 447-453
12. N. Rajapaksha, S. Jayasinghe, H. Enshaei and N. Jayarathne, "Acoustic Analysis Based Condition Monitoring of Induction Motors: A Review," 2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC). Kigali. Rwanda. 2021. pp. 1-10.
13. E. M. Mahani, A. Mirabadi, A. Rezazadeh and A. H. Karamali, "Acoustic Fault Diagnosis of Rolling Bearings in Induction Motors Using Time-Frequency Image Analysis," 2024 4th International Conference on Electrical Machines and Drives (ICEMD), Tehran, Iran, Islamic Republic. 2024. pp. 1-6
14. N. Yordanov, M. Zhilevski and M. Mikhov, "Fault Detection in Electric Motors using Acoustic Signals and Image Classification," 2024 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova. Romania. 2024. pp. 1-6
15. E. Resendiz-Ochoa, J. M. Enriquez-Ugalde, J. J. Saucedo-Dorantes and L. A. Morales-Hernandez, "Broken Rotor Bar Failures Diagnosis with Supervised Learning and Infrared Thermography," 2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). Dallas. TX. USA. 2021. pp. 499-504.
16. S. Kilickaya, C. Celebioglu, L. Eren and M. Askar, "Thermal Image-Based Fault Diagnosis in Induction Machines via Self-Organized Operational Neural Networks," 2025 IEEE Symposium on Computational Intelligence on Engineering/Cyber Physical Systems (CIES), Trondheim, Norway. 2025. pp. 1-7.
17. Ali A., El-Serafi K., A. K. Mostafa S., El-Sheimy N. Frequency Features Based Fuzzy System for Rotating Machinery Vibration Analysis Using Smartphones Low-Cost MEMS Sensors. *Journal of Sensor Technology*. 2016. Vol. 6 (3).pp. 56-74.
18. Hafizh H., Ali M.N.N., Abdul Majeed A.P.P. Vibration Condition Monitoring of Rotating Machinery with IoT and Smartphone Sensors. In: Tan, A., et al. *Advances in Intelligent Manufacturing and Robotics. ICIMR 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2024. Vol 845. pp. 421-431.

Authors of the publication

Sergey V. Derkachev - Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-5801-7081>. *Email:* sergey_derkachev@mail.ru.

Vladimir A. Sidorov - Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia. *ORCID:* <http://orcid.org/0000-0001-6794-7838>. *Email:* sidorov_va58@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **19.01.2026 г.**

Отредактировано **23.04.2026 г.**

Принято **26.05.2026 г.**